

**KARAYOLLARINDA RİJİT ÜSTYAPI
UYGULAMALARI VE TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Onur ECEVİT
(501031417)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Eylül 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Emine AĞAR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Abdullah Hilmi LAV (İ.T.Ü.)
Öğr.Gör.Dr. Mustafa Sinan YARDIM (Y.T.Ü.)**

EYLÜL 2007

ÖNSÖZ

Yüksek standartlı karayoluna (otoyol) geçilmesi ve hız verilmesi, dünya standartları ile paralel, çağdaş bir ulaşım ağına doğru gidiş, aynı zamanda beraberinde, daha ileri teknolojilere yer verme gereğini de ortaya koymaktadır. Türkiye'nin içinde bulunduğu ekonomik koşullar, yeni yol yapmaktan çok mevcut yol ağıımızı korumayı ve standartlarını iyileştirmek suretiyle geleceğin trafiğine yanıt verebilecek hale getirmeye ancak olanak sağlamaktadır.

Tamamen yerli kaynakları kullanan, gelişmiş ve aynı zamanda da uzun vadede ekonomik olan, buna rağmen uygulanmasına yer verilmemiş beton yol teknolojisinin dikkate alınmaması, bu konuda ön hazırlıklar yapılmaması, büyük bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir. Büyük bir bölümü ekonomik ömrünü doldurmuş olan ülkemiz karayollarında, üstyapı çalışmalarında, yeni yol, özellikle de yeni otoyol yapımında beton yol seçeneğine yer verilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla çalışmada öncelikle rijit üstyapıların, teknik ve ekonomik üstünlüklerini gösteren karayollarındaki rijit üstyapı uygulamaları üzerinde durulmaktadır. Bununla beraber; gerek kaynak gerekse mühendislik açısından ülkemiz için son derece avantajlı ve kaçınılmaz bir gereklilik olan rijit üstyapıların tasarımı için mevcut olan en son metotlar detaylarıyla incelenmektedir.

Tez çalışması ve düzeltme aşamalarında gösterdiği sabırlı yaklaşımın yanı sıra titiz ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Hocam Sayın Prof.Dr. Emine AĞAR'a, çalışmanın bilgisayar ve basım aşamalarına içtenlikle ve özveriyle destek veren ablam Zümrüt (ECEVİT) SATI'ya ve her zaman yanımda olarak bana güç veren aileme teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xx
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ ve ÇALIŞMANIN AMACI	1
2. RİJİT ÜSTYAPILARIN TARİHÇESİ	4
3. ÜSTYAPI TİPİ SEÇİM ESASLARI	7
3.1. Üstyapi Tipi Seçiminde Teknik Ölçütler	7
3.2. Üstyapi Tipi Seçiminde Ekonomik Ölçütler	11
3.3. Rijit Üstyapi- Esnek Üstyapi Karşılaştırması	15
4. DÜNYADAKİ ve ÜLKEMİZDEKİ RİJİT ÜSTYAPI UYGULAMALARI	22
4.1. Fransa	25
4.1.1. Fransa'daki ücretli yol şirketleri	27
4.1.2. Tasarımlar	27
4.1.3. Önceki derzli donatısız tipteki rijit üstyapi tasarımı	28
4.1.4. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapi tasarımında modifikasyonlar	28
4.1.5. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapi tasarımı	30
4.1.6. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için yeni donatı	31
4.1.7. LCPC-Nantes'da yapılan araştırmalar	33
4.1.8. Özet	34
4.2. Avusturya	35
4.2.1. Tasarımlar	36
4.2.2. Gözlemlenen proje bölgesi	37
4.2.2.1. A1 otoyolu- bağlanmamış rijit üstyapi	37
4.2.2.2. A1 otoyolu-geri kazanma ve yeniden yapım	38
4.2.3. Özet	41
4.3. Almanya	42
4.3.1. Üstyapi tasarımı	43
4.3.1.1. Önceki otoyol rijit üstyapısı tasarımı	44
4.3.1.2. Mevcut Alman rijit üstyapi tasarımı	47

4.3.2. Almanya'da mevcut beton gereklilikleri	52
4.3.3. Çeşitli yapım uygulamaları	52
4.3.4. Özet	53
4.4. Hollanda	54
4.4.1. Tasarımlar	54
4.4.1.1. Otoyollarda ve karayollarında kullanılan rijit üstyapılar	54
4.4.1.2. Havaalanı öngerilmeli rijit üstyapıları	55
4.4.1.3. Rijit bisiklet yolları	56
4.4.2. Gözlemlenen proje bölgesi (Eindhoven)	56
4.4.3. Özet	57
4.5. Belçika	57
4.5.1. Tasarımlar	58
4.5.2. Gözlemlenen proje bölgesi	61
4.5.2.1. Bierbeck yakınlarındaki E40 çevre otoyolu	61
4.5.2.2. E40 Bertem genişletme inşası kesimi	61
4.5.2.3. E40 otoyolu; sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı	63
4.5.3. Özet	63
4.6. Amerika Birleşik Devletleri	64
4.6.1. Rijit üstyapı tiplerinin tanımı ve kullanımı	64
4.6.1.1. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar	64
4.6.1.2. Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar	64
4.6.1.3. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar	65
4.6.2. Genel performans	65
4.6.3. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapının performansı	66
4.6.4. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için iyileştirilmiş tasarım ve inşaat metotları	67
4.6.5. Özet	67
4.7. Türkiye	68
4.7.1. Adana'da ilk rijit üstyapı uygulamaları	68
4.7.2. Afyonkarahisar'daki rijit üstyapı uygulamaları	70
4.7.3. Özet	87
5. RİJİT ÜSTYAPILARDA KULLANILAN MALZEMELER	88
5.1. Çimento Bağlayıcılar	88
5.1.1. Çimentonun özellikleri	88
5.1.1.1. Çimentonun fiziksel özellikleri	89
5.1.1.2. Çimentonun mukavemet özellikleri	90
5.1.1.3. Çimentonun rötre özellikleri	92
5.2. Agregalar	94

5.3. Çelik donatılar	101
5.4. Karma suyu	102
5.5. Katkı maddeleri	103
5.6. Beton koruma (kür) malzemeleri	104
5.7. Derz dolgu malzemeleri	105
6. RİJİT ÜSTYAPI TİPLERİ	106
6.1. Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar	106
6.2. Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar	107
6.3. Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar	108
7. DÜŞÜK VE YÜKSEK TRAFİK HACİMLİ KARAYOLLARINDA RİJİT ÜSTYAPI UYGULAMALARI	110
7.1. Düşük Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapı Kullanımı	110
7.1.1. Düşük trafik hacimli karayollarının tanımlanması	110
7.1.2. Düşük trafik hacimli karayolları için rijit üstyapılar	111
7.1.2.1. Düşük trafik hacimli karayolları için kullanılan rijit üstyapı tipleri	111
7.1.2.2. Bir rijit üstyapının iyi bir alternatif sağladığı durumlar	111
7.1.2.3. Tasarım süreci sırasında bir rijit üstyapının kullanımının karar zamanı	112
7.1.3. Düşük trafik hacimli karayolları için çimento betonu karakteristikleri	112
7.1.3.1. Çimento betonunda kullanılan agregalar	113
7.1.3.2. Çimento	115
7.1.3.3. Betonda katılmış havanın önemi	115
7.1.4. Gürültü probleminin rijit üstyapı kullanımı ile azaltılabilmesi	115
7.1.5. Düşük trafik hacimli karayolları için üstyapı tasarımı	116
7.1.6. Yerel kırsal yollar	119
7.1.6.1. Kırsal yolların karakteristikleri	119
7.1.6.2. Kırsal yolların tasarım, yapım ve bakım işleri açısından diğer yollardan farkı	119
7.1.6.3. Kırsal yolların inşası	120
7.1.6.4. Kırsal yollar için tasarım yöntemleri	122
7.1.6.5. Yerel kırsal yollar için inşa metotları	126
7.1.7. Yerel kentsel yollar	127
7.1.7.1. Rijit üstyapıların kentsel alanlara uygunluğu	128
7.1.7.2. Kentsel alanlarda kullanılan üstyapı tipleri	129
7.1.7.3. Kentsel yol üstyapılarının tasarımında kullanılan yöntemler	131
7.1.7.4. Derz yerleri ile ilgili kriterler	135
7.1.7.5. Beton karışım kompozisyonu	137
7.1.7.6. Sonuç	139

7.2. Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapı Kullanımı	140
7.2.1. Yüksek trafik hacimli karayollarının rijit üstyapılar kullanılarak inşa edilmesindeki en önemli 10 sebep	141
7.2.2. Yüksek trafik hacimli karayollarının tanımlanması	142
7.2.3. Yüksek trafik hacimli karayolları için önerilen rijit üstyapılar	143
7.2.4. Yüksek trafik hacimli karayollarında sıklıkla rijit üstyapının kullanılmasının nedeni	144
7.2.5. Üstyapı tipinin seçimi	145
7.2.6. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapıların inşasında kullanılan betonun önemli özellikleri	147
7.2.6.1. Üstyapı tepkilerine etki eden portland çimentosu betonunun özellikleri	148
7.2.6.2. Rijit üstyapıların yapısal performansında dayanımın önemi	148
7.2.6.3. Tasarım ömrü boyunca sürdürülebilecek yeterli beton durabilitesine ulaşılabilmesi	150
7.2.7. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapıların inşasında önem arz eden kritik noktalar	152
7.2.7.1. Taban zemini hazırlıklarının önemi	152
7.2.7.2. Temel/alt-temel inşasının önemi	155
7.2.7.3. Beton plak kürünün önemi	156
7.2.7.4. Kayma ve bağ donatılarının yerleşiminin önemi	156
7.2.7.5. Plak kesim derinliğinin ve zamanının önemi	158
7.2.7.6. Üstyapı düzgünlüğünün önemi	160
7.2.8. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapıların tasarımında kritik noktalar	163
7.2.8.1. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapıların tasarımındaki en iyi yaklaşım	163
7.2.8.2. Mekanistik-ampirik tasarım prosedürlerinin avantajları	164
7.2.8.3. Tasarımda göz önünde bulundurulması gereken kritik saha koşulları	165
7.2.8.4. Rijit üstyapıların tasarımı üzerinde ağır trafiğin etkileri	165
7.2.8.5. Rijit üstyapıların tasarımı üzerinde iklimin etkileri	166
7.2.8.6. Rijit üstyapıların tasarımı üzerinde taban zemininin etkileri	166
7.2.8.7. Rijit üstyapıların tasarımı üzerinde mevcut üstyapının etkileri	167
7.2.8.8. Rijit üstyapıların tasarımı üzerinde plak kalınlığının etkileri	169
7.2.8.9. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapıların yüksek dayanımlı olması gerekliliği	169
7.2.8.10. Derzli donatısız tipteki bir rijit üstyapı için enine derz tasarımının önemi	170

7.2.8.11. Enine derz aralığı	170
7.2.8.12. Kayma donatısı çapı ve kayma donatısı aralığının tasarım süreci içinde belirlenmesi	172
7.2.8.13. Şeritler arasındaki maksimum boyuna derz aralığı	173
7.2.8.14. Trafik şeritlerinin ve banketlerinin birlikte bağlanması	174
7.2.8.15. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için ihtiyaç duyulan donatı miktarı	174
7.2.8.16. Yüksek trafik hacimli üstyapılar için kullanılacak en iyi temel tipi	175
7.2.8.17. Yüksek trafik hacimli karayollarındaki rijit üstyapılar için stabilize temeller	179
7.2.8.18. Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapılar için yolun gradasyonlu agrega temeller	182
7.2.8.19. Stabilize temel tabakasının altına granüler alttemel tabakasının yerleştirilme nedeni	183
7.2.8.20. Genişletilmiş bir plağın performans üzerindeki etkisi	183
7.2.8.21. Banket tasarımında dikkat edilmesi gereken konular	184
7.2.8.22. Yüksek trafik hacimli karayollarındaki rijit üstyapılarda kullanılan drenaj sistemleri	187
7.2.8.23. Tasarımda göz önünde bulundurulacak yüzey karakteristikleri	195
7.2.9. Rijit kaplama tabakalarıyla takviye edilen mevcut üstyapı tipleri	196
8. NCHRP 1-37 A PROJESİ 2002 TASARIM KILAVUZU - YENİ VEYA YENİDEN İNŞA EDİLEN RİJİT ÜSTYAPILARIN TASARIMI	197
8.1. Giriş	200
8.2. Tasarım Sürecine Genel Bir Bakış	202
8.2.1. Tasarım girdileri	205
8.2.1.1. Deneme tasarımı girdileri ve saha koşulları	205
8.2.1.2. Tasarım girdi düzeyleri	207
8.2.1.3. Tasarım analizi periyodu süresince girdilerin işlenmesi	208
8.2.2. Yapısal tepki modeli	210
8.2.3. Artımlı hasar birikimi	210
8.2.4. Üstyapının durumuna, bozulma etkenlerine ve bakım etkilerine bağlı olarak gelecekteki performansın tahmini (bozulma tahmini)	211
8.2.4.1. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda aşağıdan-yukarıya enine çatlamlar	212
8.2.4.2. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yukarıdan-aşağıya enine çatlamlar	213
8.2.4.3. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmaları	214

8.2.4.4. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi	216
8.2.5. Düzgünlük (ırı) tahmini	217
8.2.6. Performans ve tasarım modifikasyonlarının değerlendirilmesi	217
8.2.7. Tasarım güvenilirliği	218
8.2.8. Ömür-döngü maliyetleri tahmini	219
8.3. Yeni Rijit Üstyapılar İçin Girdiler	219
8.3.1. Genel bilgi	220
8.3.2. Saha/proje tanımlanması	221
8.3.3. Analiz parametreleri	221
8.3.3.1. Başlangıçtaki uluslararası pürüzlülük indeksi	221
8.3.3.2. Performans kriteri	221
8.3.3.3. Enine plak çatlamları (derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar)	222
8.3.3.4. Enine derz bozulmaları (derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar)	222
8.3.3.5. Çatlak genişliği ve çatlaklarda yük transfer etkinliği	222
8.3.3.6. Zımbalama etkisi (sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar)	223
8.3.3.7. Düzgünlük (derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar)	223
8.3.4. Trafik	224
8.3.4.1. Temel bilgiler	224
8.3.4.2. Trafik hacmi ayarlamaları	225
8.3.4.3. Genel trafik girdileri	227
8.3.4.4. Girdilerin işlenmesi	230
8.3.5. İklim	231
8.3.5.1. İklimsel girdiler	231
8.3.5.2. İklimsel girdilerin işlenmesi	232
8.3.5.3. İklimin rijit üstyapı davranışı üzerindeki etkisi	233
8.3.5.4. Rijit üstyapı tasarımında iklim etkilerinin göz önünde bulundurulması	237
8.3.6. Drenaj ve yüzey özellikleri	238
8.3.6.1. Üstyapı yüzey tabakasının (portland çimentosu betonunun) kısa dalga emme kapasitesi	238
8.3.6.2. Sızdırma	239
8.3.6.3. Drenaj yolu uzunluğu	239
8.3.6.4. Üstyapı enine eğimi	240
8.3.7. Üstyapı strüktürü	240
8.3.7.1. Portland çimentosu betonu tabakası	241
8.3.7.2. Bitüm ile stabilize edilmiş temel	244
8.3.7.3. Kimyasal yolla stabilize edilmiş tabakalar	246

8.3.7.4. Bağlayıcısız temel/alt temel/tabana zemini	246
8.3.7.5. Mevsimsel analiz	247
8.3.7.6. Bağlayıcısız tabakaların ve taban zemininin alt-tabakalandırılması	248
8.3.7.7. Kaya tabanı	249
8.3.7.8. Taban esneklik modülünün taban zemini reaksiyonunun efektif dinamik modülüne çevrilmesi	250
8.3.7.9. Efektif dinamik k-değerinin hesaplanması	250
8.3.8. Üstyapı tasarımının göze çarpan özellikleri	252
8.3.8.1. Sıcaklık farklılıklarından doğan kalıcı kıvrılma/eğrilme	252
8.3.8.2. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların tasarımında göze çarpan özellikler	253
8.3.8.3. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımında göze çarpan özellikler	259
8.4. Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Etmenleri	262
8.4.1. Plak kalınlığı	263
8.4.2. Plak genişliği	263
8.4.3. Portland çimentosu betonu malzemeleri	264
8.4.4. Enine derz aralığı	266
8.4.5. Enine derzlerde yük transfer verimliliği	266
8.4.6. Enine doğrultudaki derz kesme derinliği	267
8.4.7. Boyuna derzlerin yük transfer etkinliği ve bağlantıları	267
8.4.8. Boyuna derz kesme derinliği	269
8.4.9. Temel	269
8.4.10. Alttemel	269
8.4.11. Yüzey-altı drenaj	269
8.4.12. Banket tasarımı	270
8.4.13. Taban zemininin iyileştirilmesi	271
8.5. Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların (Jointed Plain Concrete Pavement) Tasarım Prosedürü	271
8.5.1. Derzli donatılı tipteki rijit üstyapıların performans kriteri	271
8.5.2. Deneme tasarımı	272
8.5.3. Performans tahmini- enine çatlama	273
8.5.4. Performans tahmini- enine derz bozulması	298
8.5.5. Performans tahmini-düzgünlük	326
8.6. Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Değerlendirmeleri	332
8.6.1. Plak kalınlığı	333
8.6.2. Enine çatlak genişliği ve aralığı	333
8.6.3. Portland çimentosu betonu malzemeleri	334

8.6.4. Boyuna donatı	336
8.6.5. Boyuna donatı derinliği	336
8.6.6. Enine çatlaklarda yük transfer etkinliği	337
8.6.7. Plak genişliği	337
8.6.8. Enine donatı	338
8.6.9. Boyuna yük transfer etkinliği ve bağlantılar	338
8.6.10. Boyuna derzlerin derinliği	338
8.6.11. Temel	339
8.6.12. Taban zemini	340
8.6.13. Yüzey-altı drenaj	340
8.6.14. Banket tasarımı	341
8.6.15. Taban zemininin iyileştirilmesi	341
8.7. Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Süreci	342
8.7.1. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performans kriterleri	342
8.7.1.1. Çatlak genişliği ve yük transfer etkinliği	342
8.7.1.2. Zımbalama etkisi	343
8.7.1.3. Pürüzsüzlük	343
8.7.2. Deneme tasarımı	344
8.7.3. Zımbalama etkisinin tahmin modeli	345
8.7.4. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü	374
8.8. Özel Yükleme Koşulları	378
8.9. Yerel Koşullara Göre Kalibrasyon	380
8.9.1. Yerel koşullara uygun kalibrasyon gereksinimi	381
8.9.2. Kalibrasyon yaklaşımı	382
8.9.3. Performans tahmin modelleri	385
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	390
KAYNAKLAR	395
ÖZGEÇMİŞ	397

KISALTMALAR

AADTT	: Average Annual Daily Truck Traffic
AASHTO	: Association of State Highway and Transportation Officials
AC	: Asphalt Concrete
ASR	: Alkali-Silica Reactivity
ATB	: Asphalt Treated Base
CBR	: California Bearing Ratio
CRCP	: Continuously Reinforced Concrete Pavements
CTB	: Cement Treated Base
CTE	: Coefficient of Thermal Expansion
ESALs	: Equivalent Single Axle Loads
FWD	: Falling Weight Deflectometer
IRI	: International Roughness Index
JPCP	: Jointed Plain Concrete Pavements
JRCP	: Jointed Reinforced Concrete Pavements
LTE	: Load Transfer Efficiency
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
LCCA	: Life Cycle Cost Analysis
PCC	: Portland Cement Concrete

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Teknik parametrelere göre üstyapı seçimi.....	10
Tablo 3.2 Ekonomik parametrelere göre üstyapı seçimi.....	15
Tablo 3.3 Rijit Esnek üstyapı kıyaslaması.....	21
Tablo 4.1 AB ülkeleri ve ülkemizde karayolu varlığına ilişkin bazı göstergeler.....	23
Tablo 4.2 Avusturya karayollarının üstyapı tiplerine göre yol uzunlukları.....	35
Tablo 4.3 Belçika’da, önceki ve mevcut, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı.....	59
Tablo 4.4 Önceki ve mevcut tasarımlar sonucunda gözlemlenen çatlak aralıkları.....	60
Tablo 4.5 Elmas öğütücü ile uygulanan işlemden önce ve sonra ölçülen gürültü düzeyleri.....	61
Tablo 5.1 Çimento Bileşiklerinin Yaydıkları Hidratasyon Isıları.....	91
Tablo 5.2 Beton Agregalarının Özellikleri.....	95
Tablo 5.3 Beton Agregasında Maksimum Yabancı Madde Miktarı (TS 706).....	99
Tablo 5.4 Beton Çelik Çubukları ve Çelik Hasırları Sınıflandırma ve Özellikler.....	102
Tablo 7.1 Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan işleyen her iki yöndeki toplam taşıt sayısı (V_{TC}) değerleri.....	124
Tablo 7.2 Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan toplam trafiğin dışındaki ticari taşıt yüzdesi (a) değerleri.....	124
Tablo 7.3 Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan özel trafikteki araç tipinin bir fonksiyonu olan bir yük faktörünün (T'') değerleri.....	125
Tablo 7.4 Fransa’da taban zemini sınıflandırması.....	132
Tablo 7.5 ABCP’ye göre kentsel yolların ve otobüs durak alanları için beton plak kalınlığının tasarımı.....	133
Tablo 7.6 İspanya rijit üstyapı tasarım katalogu.....	134
Tablo 7.7 İspanya katalogunda trafik sınıfları.....	135
Tablo 7.8 Kentsel yol sistemlerindeki üstyapıların beton karışım kompozisyonları.....	138
Tablo 7.9 Kentsel yol sistemlerindeki üstyapıların beton karışım karakteristikleri.....	138
Tablo 7.10 Rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajlarının özeti.....	146

Tablo 7.11	Rijit üstyapıların tasarımında genellikle kullanılan bazı tipik zeminlerin değerleri.....	168
Tablo 7.12	Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapılar için kullanılabilir temel tiplerinin özeti.....	178
Tablo 7.13	Banket tipi/kenar destekliği kullanımı üzerine genel öneriler..	185
Tablo 7.14	Drenaj etkisinin artırılması için üstyapı en kesit önerileri.....	189
Tablo 8.1	Portland çimentosu betonunun çimento içeriği ve inşa sırasında çevredeki aylık ortalama sıcaklığa bağlı olan Sıfır Gerilme Sıcaklıkları.....	243
Tablo 8.2	Tasarımda kullanılması için önerilen temel/plak tipik sürtünme katsayı değerleri.....	261
Tablo 8.3	Rijit plağın tabanındaki kritik gerilim hesaplamasında kullanılan nöral ağ girdi parametrelerinin dağılım alanı.....	279
Tablo 8.4	Rijit plağın üstünde kritik gerilim hesaplamasında kullanılan nöral ağ girdi parametrelerinin dağılım alanı.....	279
Tablo 8.5	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlakların önceden tahmin edilmesi için gerekli girdi parametrelerinin özeti.....	283
Tablo 8.6	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bozulma analizleri için hazırlanan köşe defleksiyonlarının hesaplanmasında nöral ağlar için girdi parametrelerinin dağılımı.....	305
Tablo 8.7	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine derz bozulmalarının önceden tahmini için girdi parametrelerinin özeti.....	308
Tablo 8.8	Farklı temel tipleri için varsayılan efektif yük transfer etkinliği	313
Tablo 8.9	Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların yüzeyindeki kritik gerilmeleri hesaplayan nöral ağlar için atanmış girdi parametrelerinin dağılımı.....	351
Tablo 8.10	Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi için girdi parametrelerinin özeti.....	354
Tablo 8.11	Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tepki modeli için trafik yüklerinin çevrim kuralları.....	355
Tablo 8.12	Farklı banket tipleri için tipik derz rijitlikleri.....	360
Tablo 8.13	Analiz periyot aralıklarıyla değişen girdi parametreleri.....	369

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : 1920 ile 1930'lu yıllarda rijit üstyapı uygulamaları.....	4
Şekil 2.2 : Kayar kalıp sistemi ile rijit üstyapı uygulaması.....	6
Şekil 3.1 : Esnek ve rijit yol üstyapılarında yük dağılımı.....	7
Şekil 4.1 : Paris'in güneyinde yer alan, 40 yaşındaki A6 otoyolunun derzli donatısız tipteki rijit üstyapı kesimi. (Genişletilmiş sınırla eklenen şerit dikkat çekmektedir.).....	26
Şekil 4.2 : Yeniden inşa edilen trafik şeritlerinin tasarımında Fransız trapezoidal enkesit örneği.....	28
Şekil 4.3 : Fransa'da ortaya çıkarılmış bir agrega yüzeyin fotoğrafı.....	30
Şekil 4.4 : Fransa'da mevcut asfalt üstyapıya eklenmiş, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı ile inşa edilmiş kamyon şeridi.....	31
Şekil 4.5 : Fransa'da geliştirilen, halka şeklinde sarılabilen dikdörtgen donatı (FLEXARM).....	32
Şekil 4.6 : Fransız LCPC Nantes dairesel test alanları.....	34
Şekil 4.7 : Avusturya'da A1 otoyolunun yeniden inşasında kullanılan derzli donatısız tipteki rijit üstyapı enkesiti.....	38
Şekil 4.8 : Avusturya'da iki tabakalı konseptte göre inşa edilmiş beton plak.....	40
Şekil 4.9 : Avusturya'da çeşitli yüzeylendirmeler için ölçülen ses emisyon grafiği.....	41
Şekil 4.10 : Berlin yakınlarında 1930'lu yıllarda inşa edilen Alman otobanı rijit üstyapısı.....	43
Şekil 4.11 : Derzli donatısız tipteki Alman rijit üstyapı tasarımı.....	48
Şekil 4.12 : Çentiklenmiş veya derzlendirilmiş zayıf beton temel tabakası üzerindeki beton plak.....	49
Şekil 4.13 : Almanya'da üstyapı enkesitinde üniform olmayan kayma donatısı yerleşimi.....	50
Şekil 4.14 : Berlin'in güneyinde A10 otoyolu inşa kesiminde; plak kenarında zayıf beton temel altındaki boyuna kanala ve sol tarafta görülen rögarlara bağlı olan su toplama hazneleri.....	51
Şekil 4.15 : Poro beton temel tabakalı şeritlerin yeniden inşasında kullanılan Alman enkesiti.....	51
Şekil 4.16 : Hollanda'da derzli donatısız tipteki rijit üstyapı üzerine yerleştirilen poroz beton yüzey.....	57
Şekil 4.17 : Dreve de Lorraine Karayolu, Brussels; 1925 yılında boyuna derz olmadan inşa edilmiş olan derzli rijit üstyapı.....	58

Şekil 4.18	: Beçika’da; donatı içeriği % 0.85 olan, asfalt betonu ara tabakalı, zayıf beton temel ve granüler alt temele sahip, 30 yaşını geçmiş olan sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı.....	59
Şekil 4.19	: Geciktirici spreylendikten sonra beton yüzeyin üzerine yerleştirilen polietilen örtü (Robuco süreci).....	62
Şekil 4.20	: Polietilen örtü kaldırıldıktan sonra yüzeydeki harcı alarak agregalarının ortaya çıkarılmasını sağlayan döner fırça.....	62
Şekil 4.21	: Adana Mavi Bulvar (Yapım yılı: 1986, 2x2 şerit).....	68
Şekil 4.22	: Adana Turgut Özal Bulvarı (Yapım yılı: 19861987, 2x3 şerit).....	69
Şekil 4.23	: Adana Adnan Menderes Bulvarı (Yapım yılı: 1987, 2x2 şerit).....	69
Şekil 4.24	: Adana Özdemir Sabancı Bulvarı (Yapım yılı: 1994, 2x2 şerit).....	69
Şekil 4.25	: Adana İncirlik Hava Üssü çevre güvenlik yolu beton dökümü.....	70
Şekil 4.26	: Afyonkarahisar’da yapılan rijit üstyapının yeri.....	71
Şekil 4.27	: Emirdağ Ayrımı Yolu tipik en kesiti.....	72
Şekil 4.28	: Enine derz detayları.....	78
Şekil 4.29	: Boyuna derz detayları.....	79
Şekil 4.30	: Kayma demirlerinin boyanması.....	83
Şekil 4.31	: Kayma demirlerinin sehpaye yerleştirilmesi.....	84
Şekil 4.32	: Bağlantı demirleri (Φ 12 mm).....	84
Şekil 4.33	: Kayar kalıp finişer.....	85
Şekil 4.34	: Kılavuz telinin gerilmesi.....	85
Şekil 6.1	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar.....	107
Şekil 6.2	: Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar.....	108
Şekil 6.3	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar.....	109
Şekil 7.1	: Bazı Avrupa ülkelerine ait tasarım kılavuzlarındaki gradasyon eğrileri.....	114
Şekil 7.2	: İspanya’daki Castilla-Leon bölgesinde; düşük trafik hacimli yollardaki gereksinim duyulan ince taneli agregalara ait gradasyon eğrileri.....	114
Şekil 7.3	: Yerel kırsal yollar.....	120
Şekil 7.4	: Kırsal yollarda plak kalınlığı ve derz aralıkları.....	121
Şekil 7.5	: Kırsal yollarda ikili beton şerit yapımı.....	121
Şekil 7.6	: Kırsal yollarda ikili beton şeritlerin inşası.....	122
Şekil 7.7	: Avusturya çimento betonu yol tasarım katalogu (kalınlıklar mm).....	123
Şekil 7.8	: Kırsal yollar için Belçika’da kullanılan tasarım diyagramı....	123
Şekil 7.9	: Yerel kırsal yollarda elle yapılan rijit üstyapılar.....	127
Şekil 7.10	: Yerel kentsel yollar.....	127
Şekil 7.11	: Belçika-Ghent’de rijit üstyapılı bir ada kavşak.....	128
Şekil 7.12	: Belçika-Scherppenhoevel’de rijit üstyapılı bir ada kavşak.....	129
Şekil 7.13	: Fransa-Chambery’de rijit üstyapılı bir ada kavşak.....	129

Şekil 7.14	: Kimyasal geciktirici kullanılarak elde edilen rijit üstyapı yüzeyi.....	130
Şekil 7.15	: Ön-şekillendirme yöntemiyle elde edilen rijit üstyapı yüzeyi	131
Şekil 7.16	: Rijit üstyapıların rijit elemanlarla birleşimi.....	136
Şekil 7.17	: Yol kesişimlerindeki plak formları.....	137
Şekil 7.18	: Kentsel alanlarda tipik derz düzenlemeleri.....	137
Şekil 7.19	: Rijit kaplamalı otobüs durakları.....	139
Şekil 7.20	: Rijit üstyapılar beklenen performansı gösterecek yüksek bir güvenilirlik düzeyinde tasarlanabilir ve inşa edilebilirler.....	142
Şekil 7.21	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar ağır trafikli karayolları için uygulanabilir bir alternatiftir.....	144
Şekil 7.22	: Betonun kuru kritiktir. Su kuru inşa sırasındaki yüksek sıcaklık gradientlerini, yüksek sıfır-gerilme sıcaklıklarını ve aşırı rötreyi önler.....	156
Şekil 7.23	: Kayma donatıları kabul edilebilir toleranslarla yerleştirilebilir. Günlük saha ölçümleri kritiktir.....	157
Şekil 7.24	: Bağ donatılarının yerleşimi oldukça önemlidir ve günlük ölçüm gerektirir.....	158
Şekil 7.25	: Kaliteli inşa süreci oldukça önemlidir ve müteahhitlere ödenen teşvik primi bu konuda yardımcı olmaktadır.....	163
Şekil 7.26	: Beton takviye tabakaları herhangi bir tipteki mevcut üstyapı üzerine yerleştirilebilirler fakat tasarımda mevcut üstyapının tasarımı ve durumu göz önünde bulundurulmalıdır	169
Şekil 7.27	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlama plak kalınlığına ve derz aralığına bağlı olarak değişimi (iki durum da oldukça kritiktir).....	171
Şekil 7.28	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının kayma donatısına bağlı olarak değişimi.....	173
Şekil 7.29	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda donatı içeriğinin yapısal performansa olan etkisi (uygulamaların çoğunluğunda % 0.7-% 0.8 önerilmiştir).....	175
Şekil 7.30	: Asfalt banket boyunca her bir enine derz boyunca görülen erozyon. Ağır taşıtlar derz üzerinden geçtiğinde plak altında bulunan su büyük bir hızla dışarıya doğru çıkmak için zorlanır.....	179
Şekil 7.31	: Genişletilmiş banketler (0.5 m) plak kenarındaki yükleri, derz bozulmalarını ve plak çatlama plak azaltır.....	184
Şekil 7.32	: Rijit banketler yapısal desteklik sağlarlar ve acil durum şeridi olarak kullanılabilirler.....	186
Şekil 7.33	: Üstyapı sisteminde nem kaynakları.....	188
Şekil 7.34	: Uzatılmış geçirimli temel sistemi.....	193
Şekil 7.35	: Kenar dren borulu erozyona dayanıklı temel.....	194
Şekil 7.36	: Poro beton banketli erozyona karşı dayanıklı temel.....	194
Şekil 7.37	: Rijit takviye tabakası mevcut bir üstyapı üzerine yerleştirilirken.....	196
Şekil 8.1	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların genel tasarım süreci	204
Şekil 8.2	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların genel tasarım süreci	205

Şekil 8.3	: Olası üstyapı tabaka sisteminin gösterimi.....	206
Şekil 8.4	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yorulma hasarı ile çatlamış plak yüzdesi arasındaki ilişki.....	212
Şekil 8.5	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda aşağıdan yukarıya çatlamalar için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi.....	213
Şekil 8.6	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yukarıdan aşağıya çatlamalar için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi.....	214
Şekil 8.7	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bozulma analizleri için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi.....	215
Şekil 8.8	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi analizleri için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi.....	216
Şekil 8.9	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamaların ortalama tekerlek yoluna olan duyarlılığı.....	227
Şekil 8.10	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamaların trafik gezinim standart sapmasına olan duyarlılığı.....	228
Şekil 8.11	: Gündüz saatlerindeki pozitif sıcaklık farklılığına ek olarak plak altında yüksek çekme gerilmesi ile sonuçlanan kritik trafik yükleme pozisyonundan kaynaklanan portland çimentosu plağın kıvrılması.....	234
Şekil 8.12	: Gece saatlerindeki negatif sıcaklık farklılığına ek olarak plak üstünde yüksek çekme gerilmesi ile sonuçlanan kritik trafik yükleme pozisyonundan kaynaklanan portland çimentosu plağın kıvrılması.....	234
Şekil 8.13	: Tipik bir bahar günü için portland çimentosu plağın 10 in derinliği boyunca gözlemlenen sıcaklık profili örneği.....	235
Şekil 8.14	: Rijit üstyapıların yapısal tepki hesaplamaları için yapısal model.....	250
Şekil 8.15	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamaların plak kalınlığına ve derz aralığına olan duyarlılığı.....	254
Şekil 8.16	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının kayma donatısına olan duyarlılığı.....	255
Şekil 8.17	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kenar destekliğinin enine çatlamalar üzerindeki etkisi.....	256
Şekil 8.18	: Kayma donatısız derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kenar destekliğinin enine çatlamalar üzerindeki etkisi.....	257
Şekil 8.19	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda donatı içeriğinin zımbalama etkisi üzerindeki etkisinin gösterimi.....	259
Şekil 8.20	: Saha verileriyle gösterilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların çatlama modeli.....	275
Şekil 8.21	: Çatlama modeli ile verilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların örnek çatlama tahminleri.....	275
Şekil 8.22	: Kısmen üstyapı dışına çıkan aks yükünün de etkilerini içeren kapsama olasılığının grafiksel gösterimi.....	281
Şekil 8.23	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda farklı aks tiplerini dikkate alan aşağıdan yukarıya çatlak hasar birikimi: (a) tekil, (b) tandem, (c) üçlü ve (d) dörtlü akslar.....	285

Şekil 8.24	: Rijit plak sınırından farklı uzaklıktaki trafik geçişlerine göre yorulma hasar katkısının gösterimi.....	291
Şekil 8.25	: Örnek bir tasarım için farklı güvenilirlik seviyesinde istenen rijit plak kalınlıkları.....	294
Şekil 8.26	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların enine çatlamları üzerinde kenar desteklik özelliklerinin etkileri.....	296
Şekil 8.27	: Portland çimentosu betonunun elastik modülünün ve dayanımına oranı sabit tutulduğunda, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların portland çimentosu betonunun dayanımına göre değişimi. (Eğer çimento içeriği arttırılırsa, α_{PCC} ve rötrenin dayanıma bağlı olarak değişebileceğini göz önünde tutunuz.).....	296
Şekil 8.28	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda temel tipinin enine çatlamlara etkisi.....	297
Şekil 8.29	: İstenen rijit plak kalınlığını belirlemede tekrarlı süreç.....	297
Şekil 8.30	: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının hasar birikimi için farklı aks tiplerinin dikkate alınması: (a) tekil, (b) tandem, (c) üçlü ve (d) dörtlü akslar.....	308
Şekil 8.31	: Farklı güvenilirlik düzeyleri için tahmin edilen bozulma.....	317
Şekil 8.32	: Kayma donatısının güvenilirlik düzeyi üzerindeki etkisi.....	317
Şekil 8.33	: Tahmin edilen bozulmada temel aşınabilirliğinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	319
Şekil 8.34	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminleri üzerinde temel aşınabilirliğinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	319
Şekil 8.35	: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde banket tipinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	320
Şekil 8.36	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde banket tipinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	320
Şekil 8.37	: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde plak genişletmesinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	321
Şekil 8.38	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde plak genişletmesinin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	322
Şekil 8.39	: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde derz aralığının etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	323
Şekil 8.40	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde derz aralığının etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	323
Şekil 8.41	: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde kalıcı çarpılmanın/eğrilmenin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	324
Şekil 8.42	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde kalıcı çarpılmanın/eğrilmenin etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	324
Şekil 8.43	: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde sıfır gerilme sıcaklığının etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	325
Şekil 8.44	: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde sıfır gerilme sıcaklığının etkisi (%50 lik güvenilirlik).....	325
Şekil 8.45	: Tasarım ömrü boyunca tahmin edilen IRI (ilk IRI=63in/mi)?	328

Şekil 8.46	: Üstyapıda aşırı gerilmeler sonucu oluşan anahtar bozukluklar ve saha değişkenlerinin derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerinde etkileri.....	331
Şekil 8.47	: Kayma donatısının derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki etkileri.....	332
Şekil 8.48	: Hasar birikimine karşı gözlemlenen zımbalama etkileri.....	346
Şekil 8.49	: Verilen bir kesim için sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisinin tahmin örneği.....	347
Şekil 8.50	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi tahmin algoritması.....	368
Şekil 8.51	: Zımbalama etkisi üzerinde tasarım güvenilirliğinin etkisinin gösterilmesi (1.proje).....	369
Şekil 8.52	: Zımbalama etkisi üzerinde tasarım güvenilirliğinin etkisinin gösterilmesi (2.proje).....	370
Şekil 8.53	: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda farklı plak kalınlıkları için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı.....	371
Şekil 8.54	: Farklı kesimlerdeki çeşitli boyuna donatı yüzdeleri için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı.....	371
Şekil 8.55	: Farklı donatı derinlikleri için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı.....	372
Şekil 8.56	: Farklı beton kopma modülüne sahip kesimler için tahmin edilen zımbalama etkisi (artırılmış rötre veya α_{pcc} 'yi yansıtmaz).....	373
Şekil 8.57	: Farklı portland çimentosu betonu termal genleşme katsayıları için tahmin edilen zımbalama etkisi.....	373
Şekil 8.58	: Kalıcı kıvrılma / çarpılma efektif sıcaklık gradientleri için tahmin edilen zımbalama etkisi.....	374
Şekil 8.59	: Aşırı yüklemeler sonucu oluşan bozulmaların ve saha değişkenlerinin sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki etkisi.....	375

KARAYOLLARINDA RİJİT ÜSTYAPI UYGULAMALARI VE TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, karayollarındaki rijit üstyapı uygulamaları ve bu uygulamara yönelik tasarım yöntemleri ortaya konmuştur.

Karayollarında, kaplama tabakası çimento betonundan yapılan rijit üstyapı, kaplama tabakası asfalt betonu olan esnek üstyapı ve bu iki yapının beraber kullanıldığı kompozit üstyapı olmak üzere değişik tipte üstyapılar bulunmaktadır. Çalışmada, ara tipler ihmal edilerek birbirinden tamamen farklı olan esnek ve rijit üstyapılar, çeşitli seçim ölçütleri çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Bu seçim ölçütleri temel anlamda teknik ve ekonomik ölçütler olmak üzere ayrılmış ve üstyapı tipi seçimi yapılırken bu ölçütlerle beraber ülke koşullarının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

100 yılı geçkin süredir karayollarında hizmet veren; derzli donatılı, derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların dünyada ve ülkemizde yapılan uygulamaları gözönüne serilerek düşük ve yüksek hacimli trafiğin taşındığı karayollarında rijit üstyapı uygulamaları için örneklerle verilmiş olan öneriler sunulmuştur.

Türkiye’de yüksek standartlı yolların ve esnek üstyapılı yolların kalınlık tasarımında yıllardır kullanılan AASHTO 1972 ve daha sonra yayınlanan 1986 ile 1993 versiyonlarının tasarımda getirdiği sakıncalardan sözedilmiş ve NCHRP 1-37 A projesi adı altındaki son versiyon olan AASHTO 2002 tasarım yönteminin rijit üstyapılarla ilgili olan bölümü detaylarıyla anlatılmıştır.

Ülkemizde kaçınılmaz bir gereklilik olan rijit üstyapıların gerek kaynak gerekse mühendislik (uygulama) açısından son derece avatajlı olduğu ve rijit üstyapı teknolojisinin seçiminin, bir kalite politikasının seçimi olduğu sonucuna varılmıştır.

EXECUTIONS AND DESIGN OF RIGID PAVEMENT HIGHWAYS

SUMMARY

Rigid pavements for highways and its design methods are presented in this study.

There are different types of pavements for highways such as rigid pavements bonded by cement concrete, flexible pavements bonded by asphalt and composite pavements includes both type. Rigid pavements and flexible pavements which are completely different from each other are compared by various criterions. These criterions are divided basicly as technical and echonomical measurements and it's emphasized to take the conditions of the country into consideration while the type of pavement is being choosen.

The executions of jointed plain concrete pavements (JPCP), jointed reinforced concrete pavements (JRCP) and continuously reinforced concrete pavements (CPCP) served over 100 years in the world and our country are flaunted by presented proposals with examples of rigid pavements for low volume traffic roads and high volume traffic roads.

The deficiencies of AASHTO 1993, 1986 and 1972 used for high standardered motorways and thickness of flexible pavements layers in our country are mentioned and the section which is related with rigid pavement design expressed from the last version AASHTO 2002 under the name of NCHRP 1-37 A.

It has been observed that rigid pavements which has unavoidable necessity in our country has advantages both on material sources and on engineering applications. Moreover, it has been concluded that decision of rigid pavement technology is the decision of a quality policy.

1. GİRİŞ ve ÇALIŞMANIN AMACI

Bir ülkedeki ulaşım ağı, o ülkenin can damarları sayılır ve ülke ekonomisinin gelişmesinde en başta gelen parametrelerden biridir.

Türkiye’de de özellikle karayollarında, 1950 yılından itibaren büyük bir karayolu yapım etkinliğine gidilmiş, bu konuda da büyük mesafeler alınmıştır. Fakat yansıtılan sonuçlar, genellikle ulaşım hatlarının niteliğinden çok niceliği, yani yolların uzunluğu üzerinde yoğunlaştırılmış, yenileme çalışmalarında da toprak yolların ilk aşamada stabilize kaplamaya, stabilize yolların da bitümlü kaplamalara dönüştürülmesi esas alınmıştır.

Son 25 yılın en büyük gelişmelerinden biri de yüksek standartlı karayoluna (otoyol) geçilmesi ve hız verilmesi olmuştur. Böylece dünya standartları ile paralel, çağdaş bir ulaşım ağına doğru gidiş, aynı zamanda beraberinde, daha ileri teknolojilere yer verme gereğini de ortaya koymaktadır. Bu nedenle ülkemizde beton yol uygulamasına geçme zorunluluğu ortaya çıkmakta, bunun için de yeterli ve gerekli koşulların bulunduğu görüşüne varılmaktadır.

1996 yılı itibarı ile Türkiye’deki karayolları ağı, toplam olarak 60.000 km. civarında uzunluğa sahip olup, ayrıca yaklaşık 500 km uzunluktaki bir yol ağı da tasarım halinde bulunmaktadır. Bu yol ağının yaklaşık 50.000 km uzunluktaki bölümü asfalt kaplamalı, geri kalan kısmı ise diğer tür kaplamalı (stabilize, parke, toprak) olarak yapılmıştır.

Ülkemizdeki karayolu trafiğinde ise, ilginç bir özellik olarak ağır taşıt oranı, toplam trafik içinde %50 ile 70 arasında pay almaktadır. Bu oran gelişmiş ülkelerde %10-20 kadardır. 1985 yılında yürürlüğe giren 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu’nun yönetmeliği ile, yasal tekil dingil yükü 10 tondan 13 tona, çift (tandem) dingil yükü ise 16 tondan 19 tona çıkarılmıştır. Ülkemizde yeterli düzeyde ağırlık kontrolü yapılmadığı ve genellikle de aşırı yüklemelere gidildiği için toplam trafik içinde yer alma payı oldukça fazla olan ağır taşıtların, yola verdikleri yıpranma zararı da o oranda artmaktadır.

Ayrıca Türkiye’de, petrol fiyatlarındaki artışın beraberinde getirdiği bitümlü malzeme fiyat artışı ve bunun yanı sıra otomotiv sanayindeki gelişmenin beraberinde getirdiği taşıt sayısı artışı dikkate alındığında, mevcut yol ağımızın, gerek nitelik gerekse nicelik olarak tehlike sinyalleri verebilecek düzeye gelmekte olduğunu öngörmek hiç de zor değildir. 1983-1993 ulaştırma ana planının karayolu planlaması bölümünde, bir yandan ağır taşıt oranının yüksekliği, diğer yandan da her bir taşıtın zarar faktörünün oldukça yüksek olması nedeniyle ülkemiz karayollarının, oransal olarak diğer ülke karayollarına kıyasla 8 kere daha fazla yüklendiği, ekonomik ömürlerinin azaldığı, bakım ve onarım çalışmalarının daha sık yapılması ile bu yolların hizmet verebilir düzeyde tutulabilmelerine çalışılacağı, bunun için de periyodik üstyapı yenilemeleri yapılacağı ve plan dönemi sonunda bütün yolların asfalt kaplamalı hale getirileceği belirtilmiştir.

Bu açıklamalar, günden güne daha fazla yüklenen karayollarımızda beton yol uygulaması bulunmadığı gibi, bu uygulamaya geçmenin de planlanmadığını, sadece üstyapı koruma çalışmalarına ağırlık vermekle yetinildiğini ortaya koymaktadır.

Ülkemiz karayollarında bitümlü kaplamalar, özellikle 1950 yılından beri uygulanmaya geldiği için, bu konuda belirli bir bilgi birikimi oluşmuş ve eleman sayısı da önemli ölçüde artmıştır. Asfalt kaplama yapımı ve bakımı için de, büyük kısmı ekonomik ömrünü doldurmakla beraber, önemli sayılabilecek bir makine parkı da oluşturulmuştur. Türkiye’nin içinde bulunduğu ekonomik koşullar, yeni yol yapmaktan çok mevcut yol ağımızı korumayı ve standartlarını iyileştirmek suretiyle geleceğin trafiğine yanıt verebilecek hale getirmeye ancak olanak sağlamaktadır. Nitekim böylesi bir takviye ve kademeli yapım yöntemi, esnek üstyapı uygulamalarında olası ve kolay görülmektedir.

Tamamen yerli kaynakları kullanan, gelişmiş ve aynı zamanda da uzun vadede ekonomik olan, buna rağmen uygulanmasına yer verilmemiş beton yol teknolojisinin dikkate alınmaması, bu konuda ön hazırlıklar yapılmaması, büyük bir hata ve eksiklik olarak değerlendirilmekte, büyük bir bölümü ekonomik ömrünü doldurmuş olan ülkemiz karayollarında, üstyapı çalışmalarında, yeni yol, özellikle de yeni otoyol yapımında beton yol seçeneğine yer verilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Esnek üstyapıların servis ömrünü kısaltan, sık sık onarım ve takviyesine gereksinim gösteren, gerek hacim gerekse ağırlık olarak sürekli artış gösteren trafik, bir noktadan sonra esnek üstyapılı karayollarında büyük sorunlar olabilecek düzeye gelirken, bu

trafiğin beton kaplamalı yollarda daha sorunsuz taşınabilecek olması, dikkate alınması gereken ilk parametre sayılmaktadır.

Üstyapı bakım ve onarım giderlerinin, esnek kaplamalı yollarda daha yüksek olması nedeniyle daha az onarım ve bakım masrafı gösteren yol yapım tekniklerine gereksinme duyulması, buna alternatif seçenek olarak da, beton yol yapımına yönelinmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Bunun en güncel örneği 0-2 sayılı otoyol (TEM) üzerindeki onarım ve yenilenme çalışmalarında görülmektedir. Oldukça yeni sayılabilecek bu otoyol kaplaması, tahmin edilenin çok altında bir sürede kaplama onarımını ve yenilenmesini gerektirmiş, bu da ek yapım masraflarının yanı sıra otoyol üzerinde tıkanmalara, uzun kuyrukların oluşmasına, böylece zaman ve yakıt kaybına yol açmıştır.

Ülkemizde çimento sanayinin gelişmiş olması da ham madde ve malzeme yönünden büyük bir avantaj sağlamakta, buna karşılık petrol temini açısından dışa bağımlı olmamızın yaratacağı sorunların, çimento temini konusunda yaşanmayacağı gerçeği ortaya çıkmaktadır.

Mevsimler arasında büyük sıcaklık farkları bulunan ülkelerde, esnek üstyapılar daha az ömürlü ve dayanıksız olup, daha fazla bakım ve onarıma gereksinme gösterdiği bilinen bir gerçektir. Buna karşılık bu şekildeki iklim koşullarından beton yollar çok daha az etkilenmekte, hemen hemen hiç bozulmamakta, dolayısı ile de herhangi bir bakım ve onarım zorunluluğu getirmemektedir. Türkiye’de genellikle kara iklimi hakim olup mevsimler arasındaki sıcaklık farklılıkları da fazladır. Bu da rijit üstyapı (beton yol) konusunu gündeme getiren önemli bir husustur.

Bu çalışmada; rijit üstyapıların, teknik ve ekonomik üstünlüklerini gösteren karayollarındaki rijit üstyapı uygulamaları üzerinde durulmuştur. Gerek kaynak gerekse mühendislik açısından ülkemiz için son derece avantajlı ve kaçınılmaz bir gereklilik olan rijit üstyapıların tasarımı için de mevcut olan en son metotlar detaylarıyla anlatılmıştır.

2. RİJİT ÜSTYAPILARIN TARİHÇESİ

Eski çağlarda kireç-puzolan harcı ile bağlanmış taş ve agregalardan oluşan yol kaplamalarının kullanıldığı bilinmektedir. Belgelenmiş olan ilk rijit üstyapı Amerika Birleşik Devletleri- Ohio Bellefontin kasabasında George Batholomew tarafından 1891 yılında inşa edilmiştir. George Batholomew bu proje girişiminden önce yapacağı üstyapının en az 5 yıl dayanacağına dair 5000 dolarlık garanti bedeli yatırmak zorunda kalmıştır. Ancak yapacağı üstyapının 100 yıldan daha uzun bir süre için hizmet vereceğini düşünememişti veya rijit üstyapılar adına sahip olduğu düşüncenin dünyanın her bir yanına yayılacağını bilememiştir. 12 Kasım 1991’de Batholomew’in torunları, kasaba halkı ve ilgili resmi devlet daireleri Amerika’da rijit üstyapıların doğuşunun yüzüncü yılını kutlamak için bir araya gelmişlerdir. [18]

1920 ile 1930 yılları arasında rijit ve diğer tip üstyapıların taşınma, yerleştirme, sıkıştırma ve tamamlama işlemleri elle yapılan iş gücüne dayanmaktaydı.



Şekil 2.1: 1920 ile 1930’lu yıllarda rijit üstyapı uygulamaları [18]

Amerika Birleşik Devletlerinde motorlu taşıt kullanımının artışı ile rijit üstyapılar için belirli koşulların belirlenmesi gereği ortaya çıktı. Bundan dolayı, daha iyi yol yapım metotları ile tanışılmış olundu ve mekanik kaplama doğmuş oldu.

Beton yolların yaygınlaşması 20.Yüzyılın ortalarına doğru hız kazandı. Yüzyılın ilk yarısında A.B.D.’ye ilaveten Fransa ve Belçika’da, daha sonra Almanya’da beton

yollar yapılmıştır. 1930' lu yıllarda 2. Dünya Savaşı'na hazırlanan Almanya'da beton otoyolların uzunluğu 4000 km'yi bulmuştur. 1945-1975 yılları arasında İngiltere'deki rijit üstyapıların çoğu, kaplamanın her iki yanına yerleştirilmiş olunan raylar üzerinde ilerleyen mekanik kaplayıcılar aracılığı ile yapılmaya başlanmıştır. A.B.D. de 1957 yılında başlayan "Eyaletlerarası Otoyol Sistemi" tamamlandığında önemli bölümü beton kaplama olarak 60 000 km'den fazla yol yapılmıştır. Bu gün A.B.D. de bazı büyük şehirlerin çevre yolları da beton kaplamadır. Son 50 yıl içerisinde Belçika, Fransa, Almanya'ya ve Avustralya' ya ilaveten Avusturya, İspanya, İngiltere, Kanada ve Güney Afrika gibi ülkelerde beton yollar yapılmıştır. Son yıllarda Hindistan ve Çin'de büyük beton yol projeleri başlatılmıştır. [9]

Zamanla yüksek verimlilik ve uygulanabilirlik özelliğinden dolayı kayar-kalıp sistemi ile kaplama işlemi en çok kullanılan metot haline gelmiştir. Kayar-kalıp tipli kaplayıcılar kenar kalıplarına ihtiyaç duymadan hazırlanmış alt-temel üzerinde hareket ederek gerekli sıkıştırma ve düzeyleme işlemini aynı anda gerçekleştirebilirler.

Kayar-kalıp sistemi, Iowa Eyaleti Karayolları komisyonunda malzeme mühendisi olarak çalışan J. W. Johnson tarafından geliştirilmiştir. [18]

Günümüzdeki mekanik kaplama araçları eskiye göre daha karmaşık hale gelmiş ve otomatikleştirilmiştir. Bu tip araçlar birden fazla şeridi tek bir geçişte yerleştirebilmektedirler.



Şekil 2.2: Kayar kalıp sistemi ile rijit üstyapı uygulaması [18]

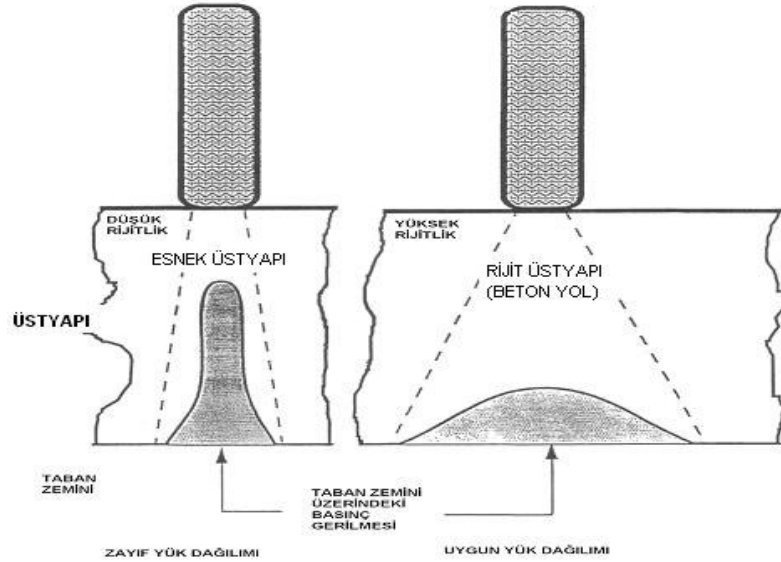
3. ÜSTYAPI TİPİ SEÇİM ESASLARI

Günümüzde, motorlu taşıt trafiğindeki sürekli artışlar ve kaynak sağlanmasındaki güçlükler karşısında, yeni karayolu yapmaktan çok, mevcut karayolu üstyapılarının gelecekteki yoğun ve ağır trafiğe cevap verebilecek şekilde yenilenmesi önem kazanmaktadır. Gerek yeni karayolu yapımında, gerekse üstyapı yenileme çalışmalarında üstyapı seçimi büyük önem taşımaktadır. Zira karayollarında üstyapı tipi seçimi, değişik ve çok sayıdaki ölçütlere dayandırılması gereken kapsamlı bir konu özelliği taşımaktadır. Seçim yapılırken, üstyapı tipleri teknik ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınarak, karara varılmalıdır.

3.1 Üstyapı Tipi Seçiminde Teknik Ölçütler

Dıştan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi

Yol üstyapısını, esnek ve rijit olmak üzere iki esas gruba ayırmak olanaklıdır. Esnek ve rijit üstyapılar, trafik yükünü taban zeminine iletme ve tahrip olma şekilleri yönünden farklılık göstermektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Esnek ve rijit yol üstyapılarında yük dağılımı [3]

Alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan esnek üstyapılar, altyapının deformasyonlarına kolayca uyabileceğinden, zayıf ve sıkışabilir taban zeminleri için uygun gibi görünmektedir. Trafik yüklerinin bu tabakalardan geçerek taban zeminine iletilmesi, zemin içindeki klasik yük dağılışı gibi olmakta, yani, tekerlek yükleri altında esnek üstyapı, deforme olmakta ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz daha yayarak iletmektedir. Böylece, taban zeminine ulaşan yük kısmen büyük bir alana yayılmış olmaktadır. Esnek üstyapıda oluşan gerilmelerin değeri, yolun en üst tabakasından alta doğru inildikçe düştüğü için, kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilmektedir. Rijit üstyapılar, taban zemini üzerine yapılan beton plaktan oluşmaktadır. Don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı ise, beton kaplama ile taban zemini arasında kaplama altı tabakası yapılmaktadır. Beton plağın elastisite modülü taban zemininin elastisite modülünden çok büyüktür. Bu bakımdan beton yol, elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışmakta ve trafik yüklerini bu esasa göre, esnek üstyapıya nazaran daha geniş bir alana yayarak, taban zeminine iletmektedir. Taban zemini ile sürekli temas halindeyken, beton yol zemine oturan elastik kiriş gibi çalıştığından, taşıma gücü taban zemininin direncine bağlı olmayacaktır. Bu nedenle, rijit üstyapılar zayıf taban zeminleri üzerinde esnek üstyapılara nazaran daha iyi sonuç vermektedir. Çek Cumhuriyeti, Avusturya, Hollanda, ABD ve İngiltere gibi birçok ülkenin teorik çalışmaları ve deneyimleri de bu hususun doğruluğunu ortaya koymuş bulunmaktadır.

Trafik

Trafik hacmi ve yıllık trafik artış oranı yüksek, ayrıca trafik içindeki ağır taşıt miktarı yüksek olan yollar için rijit üstyapı daha uygun olmaktadır. Çelik lif takviyeli beton yollar ve sürekli betonarme yollar, normal beton yola nazaran daha pahalı olmakla birlikte, son yıllarda ABD’de ve çok az sayıda Avrupa ülkesinde (Belçika’da) yoğun trafik yükleri taşıyan yolların kaplanması ve onarımında kullanılmaktadır. Beton yollar, endüstrileşme düzeyi ne olursa olsun, bütün bölgelerde uygulanabilir bir teknolojiye sahip bulunmaktadır. Düşük trafik artışları halinde ise, kademeli inşaata elverişli esnek üstyapı ile gelişen trafiğe cevap vermek mümkün olabilmektedir.

İklim

Mevsimler arasında büyük sıcaklık farklılıkları bulunan, kara ikliminin hakim olduğu bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranışlı bir malzeme olması nedeniyle,

yazın tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi güç olmaktadır. Bu tip bölgelerde rijit üstyapıların kullanılması daha uygun olmaktadır. Ancak bu durumda, beton plaklar arasındaki derzler kışın çok açılacaktır. Bu da pompaj olayını kolaylaştırmaktadır. Derz boşluklarını uygun malzeme ile doldurmak, kayma demiri kullanmak ve beton plak ile taban zemini arasına granüler malzemeden “kaplama altı” tabakası oluşturmak suretiyle pompaj olayı sakıncası giderilebilmektedir.

Malzeme

Asfalt betonunda bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm, termoplastik bir malzeme olup, sıcaklığa bağlı olarak gevrek elastik, elasto-plastik, viskoelastik ve viskoz olmak üzere değişik reolojik hallerde bulunmaktadır. Bitümün bu özelliği asfalt betonunun (BSK'nın) özelliklerine de yansımaktadır. Bu nedenle, asfalt betonunun plentte hazırlanması, yola serilmesi ve yolda sıkıştırılması sırasında, şartnamede belirtilen sıcaklık değerlerine titizlikle uyulması gerekmektedir. Beton yolda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun özellikleri sıcaklığa bağlı olmadığından, bu sakınca bulunmamaktadır.

Asfalt betonunun gerilme-deformasyon ilişkileri, yükleme hızının ve sıcaklığın fonksiyonu olduğundan, çimento betonu gibi sabit bir elastisite modülü ve Poisson oranı bulunmamaktadır. Üstyapı projelendirme yöntemleri genellikle elastik varsayımlara dayandığından, esnek üstyapıların projelendirilmesi, rijit üstyapıya göre daha karmaşıktır. Bu güçlük yolun takviyesi sırasında da kendini göstermektedir.

Bitümlü bağlayıcıların yapısı, kaplamanın yapımından birkaç yıl sonra, bağlayıcı içindeki uçucu bileşenlerin ortamdaki uzaklaşması ve bağlayıcının okside olması ile bozulmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların “yaşlanması” adı verilen bu olay, bağlayıcının sertleşmesi, daha az uzaması, agregaya adezyonun azalması şeklinde kendini göstermektedir.

Rijit üstyapılarda, sıcaklık ve nem farkı ile, trafik yüklerinden ileri gelen gerilmeler altında beton plak çatlayabilmekte, bu bakımdan, çatlamayı önlemek ve çatlakların belirli yerlerde oluşmasını sağlamak amacıyla derzler yapılarak, kaplamayı serbest hareket eden plaklar halinde bölmek gerekmektedir. Diğer taraftan, ani sıcaklık değişimleri beton plağın altı ve üstü arasında sıcaklık farkı doğurmakta, plağın

kamburlaşmasına, eğilme gerilmelerinin artmasına yol açmaktadır. Nem farkı da benzer etkiler yaratmaktadır.

Onarım ve Bakım Kolaylığı

Beton yolun trafiğe açılabilmesi için, betonun prizini tamamlamasını beklemek gerekmektedir. Bu ise, yapım ve onarım sırasında yolun kısmen veya tamamen trafiğe kapatılmasını gerektirmektedir. Yolu trafiğe tamamen kapatma halinde, servis yolu yapılmakta ve bu da doğal olarak ek bir maliyete neden olmaktadır. Buna karşılık, bitümlü kaplamaların yapım ve onarımında, bitümlü bağlayıcının kurumasına yetecek kadar bir zaman geçmesi üzerine, yani yapımdan birkaç saat gibi kısa bir zaman sonra yolu trafiğe açmak mümkün olabilmektedir. Ancak, bitümlü kaplamalar, çimento betonu yollara nazaran daha kolay bozulmakta, dolayısıyla da daha sık bakım ve onarım gerektirmektedir.

Konfor ve Güvenlik

Her iki kaplama türü, ilk yapıldığında, güvenli, konforlu ve zevkli bir seyir sağlamaktadır. Beton yollar açık renkleri nedeniyle, gece koşullarında kolay görünmekte, siyah renkli asfalt betonu yollarda ise, durum tam tersi olmaktadır.

Üstyapı seçimini etkileyen teknik parametreler Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1: Teknik parametrelere göre üstyapı seçimi [3]

Üstyapı Tipi Teknik Parametre	Esnek Üstyapı (Kaplama tabakası asfalt betonu-BSK)	Rijit Üstyapı (Kaplama tabakası çimento betonu)
Taban zemini taşıma değeri (CBR) 20 > CBR > 6 CBR < 6	+ -	+ +
Trafik Büyük trafik hacmi Yüksek yıllık artış oranı Düşük yıllık artış oranı Yüksek ağır taşıt oranı	++ - + -	++ ++ - ++
Yüksek sıcaklık (ve farkı)	-	++
Onarımdan kaynaklanan gecikme	-	+

Tabloda (+ veya ++) işareti uygun olma durumunu, (-) işareti ise, elverişsiz olma durumunu göstermektedir.

3.2 Üstyapı Tipi Seçiminde Ekonomik Ölçütler

Ekonomik karşılaştırma yapılabilmesi için, farklı zamanlarda yapılan harcamaların aynı yıla dönüştürülmesi, güncellenmesi gerekmektedir. Güncelleme için, faiz ve iskonto hesaplarından faydalanılmaktadır. Üstyapı tipi seçiminde göz önüne alınacak ekonomik ölçütler dört başlık altında toplanmaktadır:

1- Toplam Ekonomik Maliyet

Üstyapı tipi seçiminin en önemli ölçütü, uzun bir zaman dilimi, proje ömrü için hesaplanan toplam ekonomik maliyettir. Bir karayolunun gerçek ekonomik maliyeti, ilk yapım maliyeti, proje ömrü süresindeki bakım maliyeti ve bakım işlemleri nedeniyle ortaya çıkacak kullanma açısından gecikme maliyetlerinin toplamı olmaktadır.

- ***İlk Yapım Maliyeti***

Bir üstyapının ilk yapım maliyeti hesaplanırken, aşağıda belirtilecek bazı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bunlar:

- Kullanılacak malzemelerin cins, miktar ve kaynaktaki maliyetlerinin tespiti,
- Malzemelerin taşıma maliyeti,
- İşçilik giderleri,
- İnşaat makineleri ile ilgili masraflar ve
- Sabit masraflar

olarak sıralanabilir.

Beton yolların ilk yapım maliyeti genellikle asfalt yollardan yüksektir. Ancak, asfalt üretiminde kullanılan ham petrolün çok büyük bir kısmının ithal edilmesine karşılık, Türkiye bugün çimento üretimi bakımından Dünyanın ve Avrupa'nın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Ülkemizde 5 adet rafineriye karşılık, ülkenin bütün bölgelerine dağılmış ve uluslararası standartlara uygun çok sayıda çimento fabrikası ve hazır beton üretim tesisi bulunmaktadır. Bu bakımdan beton yollar asfalt yollara göre, malzeme bakımından, daha avantajlı görünmektedir.

- ***Bakım-Onarım Maliyeti***

Trafik ve iklim koşulları yolun bozulmasına neden olan iki önemli etkidir. Bu etkilere karşı koymak, düzenli bakım yapmak suretiyle sağlanabilmektedir. Optimum bir bakım programında en önemli husus, üstyapının durumunun iyi bir şekilde bilinmesi olmaktadır.

Rijit üstyapılar, 30-40 yıllık hizmet süreleri için projelendirilmektedir. Beton yollarda yüzey yenileme ve takviye işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Projelendirme ve yapım işlemlerinin uygun şekilde gerçekleştirilmesi halinde, beton yollar tüm hizmet ömürleri boyunca az miktarda bakım gerektirmektedir. Beton kaplamaların zor ve pahalı onarımlara neden olabilecek projelendirme ve yapım hatalarına esnek üst yapılardan daha duyarlı olması nedeniyle, başlangıçtan itibaren yüksek projelendirme ve yapım standartlarına göre yapılması gerektiği vurgulanması zorunlu bir husus olmaktadır.

Diğer yandan, beton yollarda, derzi oluşturan iki komşu beton plak arasına konmuş olan bağlantı demirleri, bu plakların birbirine kıyasla düşey yönde hareket etmesini önlemektedir. Gerek trafik yükü etkisi, gerekse ısı koşulları nedeniyle, plakların yatay yönde gözle seçilemeyecek düzeyde yer değiştirmeler yapması kaçınılmaz olup, esasen bu durum, dilatasyon derzinin de yapım amacını oluşturmaktadır. Derz dolgu maddesi, zaman içinde meydana gelen sürekli genleşme ve büzülme etkisiyle, istenen niteliğini kaybetmekte, ayrıca komşu plakların derze bitişik kenar ve köşeleri de zamanla aşınmakta veya kırılmaktadır. Böylece, derz bölgesi, beton yolun içine ince malzemelerin girmesine yol açan ve su geçişine izin veren zayıf bir kesit haline gelmektedir. Bu durumda, önce derz boşluğu tamamen boşaltılıp, beton kenarlar ve yüzeyleri tel fırçalarla iyice temizlenmekte ve temiz hale gelen derz boşluğu, alt dolgu malzemesi olan dilatasyon latası konduktan sonra dökülen mastik asfalt ile doldurulmaktadır. Hava kabarcıklarının çıkmasından sonra da üst yüzey kum ile örtülmektedir.

Genellikle 20 yıllık bir süre için projelendirilen esnek üstyapılar, rijit üstyaplardan oldukça farklı bir bakım ve onarım ömrüne sahiptir. Esnek üstyapılı yollarda görülen yerel bozuklukların her kış mevsimi sonunda bakımı dışında, ilk 5 yıldan sonra, küçük onarımlar ve yüzey kaplaması gerekebilmekte, 10. yılda, yol yüzeyinin büyük bir olasılıkla yenilenmesi ve pürüzlendirilmesi gerekmekte, bir 5 yıl daha geçtikten

sonra, ilk 5. yıldaki gibi yüzey yapısını restore etmek gerekmektedir. 20 yıl sonunda ise, esnek üstyapılı yol tasarım ömrünün sonuna geleceğinden, yapının yeni bir üstyapı ile takviyesi zorunlu olmaktadır. Bunların dışında, temel ve alttemel tabakalarının onarım ve değiştirilmesi gibi çok önemli bakım çalışmaları gerekli olabilmektedir.

- ***Yolu Kullananlara Maliyet***

Normal durumlarda, lastik eskimesi, yağ, yakıt tüketimi gibi işletme masrafları, her iki üstyapı tipinde eşit durumda bulunmaktadır. 20-30 yıllık hizmet ömrü süresinde, yol bakım çalışmalarının yol açtığı gecikmeler esnek üstyapılarda büyük ekonomik zararlara yol açmaktadır. Beton yollarda bu sakınca yok denecek kadar azdır.

2- Ülkede Mevcut Yolların Üstyapı Durumu

Mevcut bir yol üstyapısının takviyesi için beton yollar ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle, ülkedeki yolların üstyapısının esnek olması halinde, takviyenin asfalt kaplama ile yapılması uygun olmaktadır. Üstyapının temel ve kaplama tabakalarının değiştirilmesinin gerekli olduğu yenileme çalışmalarında ancak rijit üstyapı seçeneği de dikkate alınabilmektedir.

3- Finansman Kaynakları ve Güncelleme (İskonto) Oranı

Üstyapı tipinin seçimi, bu yapım işinin finanse edilme şekinden de etkilenebilmektedir. Bu açıdan, yalnızca yapım giderlerinin finanse edildiği durumlarda rijit üstyapılar tercih edilmektedir. Bunun tersine, artan trafiğe cevap verebilmek için art arda tabakaların yapılması gibi bir kademeli inşaat stratejisi gerektiren, sınırlı yatırım kaynakları ve yüksek iskonto oranı gibi durumlarda, esnek üstyapıları kullanmak daha avantajlı olmaktadır. Ancak, bu tip stratejilerde üstyapıyı sürekli olarak yeterli bir hizmet düzeyinde tutmak için yüksek bakım fonları gerekmektedir.

4- Enerji Tüketimi

Enerji sorunlarının ciddilik düzeyi, zamana ve ülkelere göre değişkenlik göstermektedir. Buna ek olarak, yol yapımında kullanılan enerji, bu yolları kullanan taşıtların yakıt tüketimi yanında genellikle az kalmaktadır. Buna karşılık, kaplama yapım stratejisinin seçiminde, en önemli ölçütler olan yapım ve bakım giderlerinin yanı sıra, problemin enerji yönü de dolaylı olarak seçimi etkileyebilmektedir.

Fransa’da yol yapım, bakım ve onarım çalışmalarda harcanacak enerji miktarlarının, esnek ve rijit üstyapılar için hesaplanıp karşılaştırılması sırasında, malzemelerin elde edilmesi, taşınması, yol için gerekli karışımların hazırlanması, yola serilmesi için tüketilen enerji miktarları dikkate alınmıştır. Karşılaştırma sonunda bulunan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir.

- Asfalt enerji veren bir madde olarak alınırsa, günlük ortalama trafiğin 3000’in üstünde olması halinde, rijit üstyapıların yapımı esnek üstyaplardan daha az enerji gerektirmektedir.
- Asfalt, enerji vermeyen bir malzeme gibi düşünülürse, rijit üstyapılarda esnek üstyapıdan fazla enerji kullanıldığı görülmekte, trafik hacmi düştükçe bu fark artmaktadır.
- Yüksek trafik hacmi halinde, 25 yıllık bir periyot için, beton yolların bakımında esnek yollardan daha az enerji tüketildiği ortaya çıkmakta, düşük trafik hacmi halinde ise, iki üstyapı tipinin bakım masrafları birbirine yaklaşmaktadır.
- Günlük ortalama trafiğin 750’nin üstünde olması halinde ilk yapım ile 25 yıllık bakım için tüketilen enerji miktarı, beton yollarda esnek tipten daha az olmaktadır.

Ülkemiz koşullarına göre yapılan hesaplamalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur.

Üstyapı seçimini etkileyen ekonomik parametreler Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

Teknik ölçütlere göre seçim yapılması durumunda, taşıma gücü zayıf taban zemini, büyük hacimli trafik, yüksek yıllık trafik artış oranı, yüksek ağır taşıt miktarı, yüksek sıcaklık durumlarında rijit üstyapılar, büyük trafik hacmi, düşük yıllık trafik artış oranı durumlarında esnek üstyapılar uygun olmaktadır.

Ekonomik ölçütlere göre üstyapı seçimi yapıldığı takdirde, ömür boyu toplam maliyet, çimento, cüruf, uçucu külün bol ve kolay bulunması ve enerji azlığı durumlarında rijit üstyapılar, ülkedeki ilk yapım maliyeti ve iskonto oranının yüksek olması halinde ve takviye çalışmalarında esnek üstyapılar uygun olmaktadır.

Tablo 3.2: Ekonomik parametrelere göre üstyapı seçimi [3]

Üstyapı Tipi Ekonomik Parametre	Esnek Üstyapı (Kaplama tabakası asfalt betonu-BSK)	Rijit Üstyapı (Kaplama tabakası çimento betonu)
İlk yapım maliyeti	+	-
Ömür boyu toplam maliyet (ilk yapım+bakım+gecikmeler)	-	+
Çimento, cüruf, uçucu külün bol ve kolay bulunması	-	+
Mevcut üstyapıların esnek olması	+	-
Yüksek iskonto oranı	+	-
Enerji azlığı	-	+

Tabloda (+) işareti uygun olma durumunu, (-) işareti de elverişsiz olma durumunu göstermektedir.

Ancak, üstyapı tipi seçiminde, teknik ve ekonomik ölçütlerin birlikte dikkate alınması uygundur. Ölçütlerin tek olarak değerlendirilmesi, en uygun çözüm için yeterli olmamaktadır.

3.3 Rijit Üstyapı - Esnek Üstyapı Karşılaştırması

Gerek karayolu yapımında, gerekse üstyapı yenileme çalışmalarında, üstyapı seçimi büyük önem taşımaktadır. Çünkü karayollarında üstyapı seçimi, değişik ölçütlere dayandırılması gereken kapsamlı bir konudur. Bu seçim yapılırken üstyapı tiplerini teknik ve ekonomik yönden karşılaştırmak ve ülke koşullarını da dikkate almak gerekir. Günümüzde motorlu taşıt trafiğindeki sürekli artış ve kaynak sağlanmasındaki güçlükler karşısında çabalar, yeni karayolu yapmaktan çok mevcut karayolu üstyapılarının, gelecekte yoğun ve ağır trafiğe yanıt verebilecek şekilde yenilenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Karayollarında, kaplama tabakası çimento betonundan yapılan rijit üstyapı, yarı-rijit üstyapı (karışık üstyapı) ve kaplama tabakası asfalt betonu olan esnek üstyapı olmak üzere değişik tipte üstyapılar kullanılmaktadır. Konuda, ara tipler ihmal edilerek, birbirinden tamamen farklı yapıda olan esnek ve rijit üstyapılar, teknik, ekonomik, çevresel ve estetik yönler dikkate alınarak şöyle karşılaştırılabilir:

- 1- Mevcut üstyapılar, beton asfalt kaplamalı olup bunlarda sadece kaplamanın değişmesi şeklinde bir onarım gerekiyorsa, bu takviye çalışması için yine beton asfalt kaplama uygulaması daha uygundur.

Fakat onarım, temel ve kaplamanın değişmesi şeklinde yapılacaksa bu takdirde beton yol uygulaması seçeneğinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Nitekim kaplamanın beton asfalt ile takviye ile yenilenmesi durumunda yol, yine eski durumuna getirilmiş olunacak, fakat rijit plak yapımında o yolun kalitesi, belirgin bir şekilde yükselmiş olacaktır. Bu husus, teknik ve ekonomik parametrelerin kıyaslanacağı ciddi bir fizibilite çalışması gerektirir.

- 2- Beton asfalt kaplamalar, serilip sıkıştırıldıktan birkaç saat sonra trafiğe açılabilir. Buna karşılık rijit üstyapıların trafiğe açılması için en az 7 gün beklenmesi ve betonun belirli bir dirence ulaşım süresinin geçmesi gerekmektedir. Ancak bu husus, beton içine yapım sırasında katılan prizi ve sertleşmeyi çabuklaştırıcı katkı maddeleri ile giderilmekte ve rijit üstyapının trafiğe açılabilme süresi azaltılabilmektedir. Esasında bu tarz uygulama, rijit üstyapı zorunlu sayılır. Çünkü gecikme sonucu rijit üstyapı uygulaması olan yerlerde trafiğe yol vermek amacı ile servis yollarına gerek duyulmakta, bu da ek masrafa yol açmaktadır.
- 3- Rijit üstyapılar demir donatı kabul eden tek üstyapı tipidir. Gerektiği zamanlarda, derzlerde, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, çatlamalara karşı plak üst yüzeyine yakın yerlerde çelik donatı kullanılmaktadır. Maliyeti artıran bir husus olmakla beraber çelik donatının kullanılabilecek olması, rijit üstyapı ömrünü daha da arttıran bir avantaj sayılır.
- 4- Beton asfalt kaplamalı üstyapılarda her türlü onarım, kolay bir şekilde hatta trafik altında dahi yapılabilir. Nitekim beton asfalt kaplama çok kolay bir şekilde yama tutabilen bir malzemedir. Rijit üstyapılarda ise bu onarım çok daha zahmetli olup plağın kırılması ve yerine yeni plağın dökülmesi gerekir. Betonun demir donatının bulunması ve bunun da kesilip yeniden yapım zorunluluğu, ayrıca yeni dökülen betonun da belirli bir süre bekletilmesi gereği, bunun yaratacağı gecikme ve yolun o kısmının yine de zayıf kalabileceği olması gibi hususlar, rijit üstyapının esnek üstyapılara karşı zayıf yönleridir. Fakat rijit üstyapılar, çok daha dayanıklı bir kaplama türü olup, çok az bakım ve onarım gerektirir bu nedenle uzun vadede dikkate alındığında, onarımı çabuk ve kolay

olmasına karşılık çok sık periyotlarda onarım gerektirecek olması, esnek üstyapıların rijit üstyapılara karşı zayıf yönünü ortaya çıkarmaktadır.

- 5- Gerek esnek üstyapılarda, gerekse rijit üstyapılarda, yüzeydeki kayma sürtünme katsayıları hemen hemen aynıdır ve 0.60 ile 0.90 arasında değişmektedir. Fakat her iki üstyapının da ıslak koşullar altında olduğu durumlarda, rijit üstyapı yüzeyindeki kayma sürtünme katsayısındaki azalma, esnek üstyapıya kıyasla çok daha azdır. Bu da rijit üstyapıların, güvenlik yönünden çok önemli bir üstünlüğünü oluşturur.
- 6- Esnek üstyapılar, üzerlerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletirler. Kaplamadan temele, temelden alt temele ve nihayet alt temelden taban zeminine iletilen yükler, her bir tabaka geçişinde gittikçe yayılmakta ve daha geniş bir alana dağılmaktadır. Dolayısı ile, her bir tabakada kullanılan malzemenin mekanik özellikleri de, tabakalardan aşağı azalan gerilme değerlerine paralellik gösterir. Taban zemini zayıfsa ve çeşitli gerilmeler altında beton asfalt kaplama da deforme olan bu profili izlemekte ve sonuçta yolun en üst düzeyinde çeşitli ondülasyonlar veya oturmalar gözlenmektedir. Rijit üstyapı plağı ise, elastik bir zemine oturan bir kiriş gibi çalışır ve üzerine gelen yükleri çok daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Rijit üstyapının taşıma gücü, taban zeminin direncine bağlı değildir. Bu nedenle rijit üstyapılar, zayıf taban zeminleri üzerinde, esnek üstyapılara kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Çekoslovakya, Avusturya, Hollanda, Amerika, İngiltere gibi birçok ülkedeki teorik çalışmalar, bu konunun doğruluğunu ortaya koymuştur. Bunun bir sonucu olarak ağır trafik altındaki yollarda, rijit üstyapı uygulaması, dayanıklılığı sebebiyle çok daha iyi ve uygun sonuçlar verir.
- 7- Yapım ilerleme hızları yönünden esnek üstyapılarda bu konu, plent kapasitesine, plent ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm ve sıkıştırmadaki çabukluğa bağlıdır rijit üstyapılarda aynı konu, transmikserlerin kapasitesine ve sayısına, imalat yeri ile döküm yeri arasındaki uzaklığa, döküm sırasındaki vibrasyon ve perdahlama işlerinin çabukluğuna bağlı kalmaktadır. Burada ilerleme hızı yönünden esnek

üstyapılar, zamanla meydana gelecek ısı kaybının yaratacağı sorunlar da dikkate alınarak, daha çabuk uygulanmak zorundadırlar.

- 8- Petrol üreten veya petrol gereksinmelerinde herhangi bir sorunu bulunmayan ülkelerde esnek üstyapılar ekonomik olmakta, buna karşılık çimento üretimi yönünden ileri düzeyde bulunan ülkelerde, rijit üstyapıların daha rantabl olduğu görülmektedir.
- 9- Her iki kaplamanın sıkıştırılmasında büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Esnek üstyapıların kaplamalarının belirli bir ısıda iken (125 °C) dökülmesi ve sıkıştırılması gerekir. Bu ısı değerindeki düşmelerde, sıkıştırma iyi bir şekilde gerçekleşmemekte ve belirli bir ısının altındaki asfalt betonu, yumuşaklığını kaybetmekte, kaplamada da boşluk yüzdesi artmaktadır. Bu da sonuç olarak, nitelik yönünden istenen düzeyin altında bir kaplama tabakası ile sonuçlanır. Rijit üstyapılar ise vibratörle sıkıştırılmakta olup ısı kaybı gibi bir sorun, kaplamalar için söz konusu değildir.
- 10- Bir alt temel, temel ve beton asfalt kaplamadan oluşan esnek üstyapının toplam kalınlığı, rijit plak ve altında kumlu yastık tabakasından oluşan rijit üstyapının toplam kalınlığına kıyasla çok daha fazladır. Bütün tabakalarda ana-malzeme, agregadan oluşmaktadır. Bu nedenle sonuçta, eşdeğer niteliklere sahip olsalar dahi, esnek üstyapı yapımı için gerekecek agrega miktarı, rijit üstyapıya göre daha fazla olmaktadır. Agreganın kalitesi yönünden ise, esnek üstyapılar için çok kaliteli agreganın kullanılması zorunludur. Buna karşılık rijit üstyapılarda, daha düşük kalitedeki agreganın da kullanımına olanak bulunmaktadır.
- 11- Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı dışındaki diğer rijit üstyapılarda belirli aralıklarla derz yapılması zorunludur. Gerek rijit plakta oluşabilecek çatlakların gelişigüzel yayılmasını önleyip bir kesite toplayan, gerekse rijit plağın genişlemesine ve büzülmesine olanak veren bu derzler, buna karşılık rijit kaplamanın zayıf noktalarını oluşturmakta, belirli zamanlarda kontrol ve bakım gereksinmesi göstermekte ve sonuç olarak da ek bir maliyeti beraberinde getirmektedir. Bunun yanı sıra, hale istenen düzeydeki kalitede yapılmamışlarsa belirli bir gürültüye ve konfor eksikliğine de neden olan bu derzler, esnek üstyapılarda yapılmaz ve

esnek kaplama olması nedeniyle kendi bünyesi içinde genişip büzülebilen asfalt yollarda bu durum, belirli bir avantaj sayılır.

12- Her iki kaplama türü de iyi bir şekilde uygulanma koşulu ile hemen hemen aynı konfora sahiptir. Fakat açık rengi sebebiyle rijit üstyapılar, gece karanlığında da görülebilmekte, esnek üstyapılar gece karanlığında, herhangi bir çizgileme veya reflektörlü sınır taşları yapımı uygulanmamışsa, far ışığı altında dahi yeterli görülmemektedir.

13- Esnek üstyapılarda bağlayıcı olarak kullanılan asfalt malzemesi, bünyesinde çeşitli uçucu maddeleri içermekte ve bu uçucu maddelerin zamanla kaybolması sonunda da kaplamada yaşlanma adı verilen bir tür gevrekleşme ve eskime görülmektedir. Bu yaşlanma ile niteliklerinin ve özelliklerinin büyük bir kısmını kaybeden esnek üstyapılar ayrıca benzin, motorin, fuel oil, yağ, tuz gibi maddelerin yol üzerine dökülmesi ile de kimyasal yapılarında değişimler gösterir. Kaplamanın olumsuz yönlerde değişmesine yol açan bu durum çok kere yol güvenliği açısından da büyük tehlikeler yaratabilecek boyutlara ulaşmaktadır. Rijit üstyapılarda ise kullanılan bağlayıcı çimento olup herhangi bir uçucu madde içermemektedir. Bu nedenle sözü edilen yaşlanma olgusu, rijit kaplama için söz konusu değildir. Bunun yanı sıra, yukarıda sayılmış olan ve eritici özelliği bulunan kimyasal maddelerin beton yol üzerine dökülmesi durumunda da rijit üstyapının hiçbir özelliğinde değişme görülmemektedir.

14- Üst yüzeyi atmosfere açık olan rijit plağın alt yüzeyi ise taban zeminine oturmaktadır. Bu nedenle belirli bir kalınlığa sahip olan bu plağın alt ve üst yüzeyleri arasında belirgin ısı farkları veya ani ısı değişiklikleri olduğunda, plağın alt ve üst düzeylerinde farklı gerilmelerin oluşturacağı farklı genleşmeler görülebilir. Bu da, çekme direnci fazla olmayan rijit plağın çatlamasına yol açabilmektedir.

15- Esnek kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında, ısıtma ve kurutma işlemlerinin bulunması nedeniyle çevre kirliliğinin ortaya çıktığı görülmüştür. Rijit üstyapı yapımının ve uygulamasının hiçbir aşamasında böyle bir sorunla karşılaşılması söz konusu değildir.

- 16-** Beton asfalt üretimi, daha pahalı santraller (plantler) gerektirmektedir. Ayrıca esnek üstyapılar rijit üstyapılara kıyasla daha fazla enerji harcanması sonunda yapılır. Enerji sorunun bulunduğu yerlerde rijit üstyapı uygulaması daha uygun ve ekonomik sayılmaktadır.
- 17-** Petrol damıtan rafinerilerin sayısının az olduğu ülkelerde, esnek üstyapıların bağlayıcısı olan asfaltın, çeşitli plant veya santrallere taşınması ve nakledilmesi, yüksek bir ulaşım maliyetini de beraberinde getirmektedir. Aynı sorun çimento üreten fabrika sayısının azlığı durumunda da yaşanır. Çimento fabrika sayısının yüksek ve dağılımının da yaygın olduğu ülkelerde taşıma ve ulaşım maliyeti büyük ölçüde düşmektedir.
- 18-** Esnek kaplamalarda taban zeminindeki nem oranının en çok %2 olması istenir. Bunu üzerindeki bir değerde nem oranına sahip olan taban zeminlerinde, esnek kaplama uygulaması son derece sakıncalı olup bu durum, üstyapının özellikle de kaplamanın ömrünü büyük ölçüde azaltır. Rijit üstyapılarda ise böyle bir sorun bulunmamakta ve hatta iyi bir kenetleme için taban zemininde nemlilik, hatta ıslaklık aranmaktadır.
- 19-** Malzeme olarak esnek kaplamalar, sıcaklıkla çok yakın ilişki içindedir. Plantte veya santralde yapımının belirli bir ısı değerinin üzerinde gerçekleşmesi zorunluluğu, sonra da yüksek ısıda korunup döküm yerine iletilme, dökülme ve ısı kaybı olmadan da sıkıştırma zorunluluğu, aynı zamanda iyi ve uygun iklim koşullarına gereksinme gösterir. Nitekim, bir esnek kaplamanın yapımı ve uygulanması için hem kuru hem de sıcak bir hava gerekmektedir. Bu koşullar, uygulaması iklime bağlı olan esnek kaplamaların yapım zamanını ve süresini büyük ölçüde kısıtlar. Rijit üstyapılar için böyle bir sakınca söz konusu değildir. Aşırı yağışın ve aşırı derecede bir soğuk havanın (5 °C'nin altında) olmadığı her zamanda rijit üstyapı uygulaması yapılabilir. Bu nedenle rijit üstyapıların, yıl içindeki uygulama süresi toplamı, esnek üstyapılarınkine kıyasla çok fazladır.
- 20-** Rijit üstyapı uygulamasında, esnek üstyapı uygulamasına kıyasla daha fazla sayıda kalifiye elemana ihtiyaç duyulur. Rijit üstyapının ekonomik yönü, gerekse yapımında daha fazla özen gerektirmesi yönü açısından rijit

üstyapı aleyhine gibi görünen bu husus, aslında rijit üstyapı lehinde büyük bir kalite avantajını beraberinde getirmektedir. Daha fazla sayıdaki kalifiye eleman gereksinmesi, daha yüksek düzeydeki bir kalite anlamına gelir. Bu nedenle rijit üstyapı seçiminin bir kalite seçimi olduğu unutulmamalıdır

Yukarıda 20 madde içinde belirtilmiş olan rijit-esnek üstyapı kıyaslaması, Tablo 3.3'te özetlenmiştir. Bu tablodan da anlaşılabileceği gibi her iki üstyapı türü için de avantajlı ve uygun olan durumların yanı sıra uygun olmayan ve sakıncalı olan durumlar da sıralanmıştır. Tamamen artılardan oluşan tek bir kaplama türünün uygulanması, bu koşullarda olanak dışıdır, çünkü birçok parametre birbiri ile çelişmektedir bu nedenle üstyapı seçiminde, o yoldan beklenen performans ve ülkenin çeşitli koşulları (ekonomi, iklim, trafik, teknik olanaklar, kalite tercihi vs.) dikkate alınmak ve optimum sonuca ulaşmak zorunluluğu doğmaktadır.

Tablo 3.3: Rijit-Esnek üstyapı kıyaslaması [2]

Parametreler	Esnek Üstyapı	Rijit Üstyapı
- Trafığe çabuk açılabilme	++	-
- Demir donatı kullanabilme	-	+
- Onarım sıklığı	-	++
- Dayanıklılık	+	++
- Islak halde kayma sürtünme katsayısı	-	+
- Zayıf taban zemininin bulunması	--	+
- Yapım sırasında ısı kaybının yol açacağı sorunlar	--	+
- Kaliteli agrega gereksinimi	-	+
- Derz yapma zorunluluğu	+	-
- Seyir konforu	++	+
- Gece seyirde görüş olanakları	-	++
- Yaşlanma ve kimyasal maddelerden etkilenme	--	+
- Yapım sırasında çevre kirliliğini artırıcı etki	-	+
- Enerji azlığından etkilenme	-	+
- Taban zeminindeki ıslaklık	-	+
- İklim koşullarına bağımlılık	--	++
- Trafikte yüksek yıllık artış oranı	-	++
- Trafikte düşük yıllık artış oranı	+	-
- Trafikte yüksek ağır taşıt oranı	-	++
- Üstyapı kaplama takviyesi	+	-
- Üstyapı temel+kaplama değişimi	+	+
- Yüksek iskonto oranı ve sınırlı yatırım kaynakları	+	-

++:çok avantajlı, çok uygun; +: avantajlı, uygun; -: sakınca yaratır, uygun değil; --:çok sakıncalı, hiç uygun değil

4. DÜNYADAKİ ve ÜLKEMİZDEKİ RİJİT ÜSTYAPI UYGULAMALARI

Yolcu ulaşımında başlangıç ve varış noktaları, yük taşımacılığında ise üretim ve tüketim noktaları arasında aktarmasız bir ulaşım olanağı vermesi, taşıma kapasitesi ve güzergah seçiminde esneklik sağlaması, parça yüklerin daha kolay ve belli mesafelere kadar daha hızlı taşınabilmesi karayolu taşımacılığının başlıca özellikleridir. Bu özellikleri yanında, genelde aktarmalı taşımının söz konusu olduğu demiryolu, denizyolu ve hava taşımalarında tamamlayıcı bir tür olması sebebi ile tüm dünyada karayolu taşımacılığı diğer taşıma türlerine göre daha hızlı bir gelişme göstermiştir.

Taşıma istatistikleri incelendiğinde, gelişmiş ülkeler dahil hemen her ülkede yolcu ve yük taşımada karayolu taşımacılığının önde olduğu görülür. Nitekim AB ülkelerinde 2000 yılı itibarıyla yolcu taşımada karayolunun payı %79,0, ABD’de ise %89,1’dir. Oran Türkiye’de %95,2’dir. Yük taşımacılığında ise kısa mesafeli kıyı deniz taşımı da nazara alınırsa karayolunun payı AB ülkelerinde %45,0, ABD’de %69,4, Türkiye’de ise %76,1’dir. Boru hattı taşımı nazara alınmazsa oran Türkiye’de %92,2’ye varmaktadır.

Karayolu taşımının belirtilen avantajlarına karşılık petrole dayalı enerjiyi kullanmasından kaynaklanan hava kirliliğine sebep olması, ayrıca hemen her ülkede yaşanan trafik kazalarının getirdiği büyük maddi ve manevi kayıplar, kentlerde yaşanan trafik tıkanıklıkları, karayolu ulaşımının başta gelen olumsuzluklarıdır. Bugün dünyadaki toplam CO₂ emisyonunun %25’i, CO emisyonunun %80’i, NO_x bileşenlerinin %50’si karayolu ulaşımından kaynaklanmaktadır. Trafik kazalarında tüm dünyada ölenlerin sayısı yılda 600.000 dolayında olup bir kısmı sakatlıkla sonuçlanan 15 milyon dolayında yaralanma meydana gelmektedir. OECD ülkelerinde ölüm, yaralanma ve mal hasarı olarak trafik kazalarının maliyeti bu ülkelerin gayri safi milli hasıllarının %1 ile %2’si arasında değişmektedir. Diğer yandan karayolu taşımada petrole dayalı enerji kullanımı yanında yolcu-km ve ton-km başına tüketilen enerji diğer türlere göre önemli miktarda fazladır.

Dünyadaki gelişmenin benzeri ve daha belirgini ülkemizde görülmektedir. Yani, yukarıda verilen sayılardan da anlaşılacağı üzere, toplam yolcu ve yük taşımalarında karayolu taşımasının payı diğer taşıma türlerine göre çok yüksektir. Bu durum, ülkemizin enerji olanaklarına ters düşmesi yanında karayolu ağının kısa sürede bozulmasının ve çevre kirlenmeleri ile kazalar açısından yaşanan olumsuzlukların başlıca sebebidir.

Gerçekte ülkemizdeki karayolu altyapısı; km²'ye düşen yol uzunluğu, ayrıca standartları bakımından gelişmiş ülkelere ve girmek istediğimiz AB ülkelerine göre oldukça zayıftır (Tablo 4.1). Ancak, demiryolu ve denizyolu taşımasının altyapı ve işletmecilik olarak karayolundaki gelişmeye göre çok geride kalması, bu durumu, yani taşıma türleri arasındaki dengesizliği yaratmış, hem yolcu hem de yük taşımasında karayolu çok belirgin şekilde öne çıkmıştır.

Tablo 4.1: AB ülkeleri ve ülkemizde karayolu varlığına ilişkin bazı göstergeler [11]

	1000 km ² 'ye düşen karayolu uzunluğu (km)	10000 nüfusa düşen karayolu uzunluğu (km)
BELÇİKA	4.702	141,1
DANİMARKA	1.654	136,6
ALMANYA	1.799	79,0
İSPANYA	676	87,0
FRANSA	1.763	166,2
YUNANİSTAN	715	77,6
İTALYA	1.018	53,5
İRLANDA	1.313	257,8
LÜKSEMBURG	1.962	124,4
HOLLANDA	2.622	70,6
PORTEKİZ	718	66,6
İNGİLTERE	1.504	62,9
AVUSTURYA	1.267	132,2
FİNLANDİYA	230	151,8
İSVEÇ	302	153,7
TÜRKİYE	489	60,9
AB ORTALAMASI	1.476	117,4

Türkiye Cumhuriyeti, Osmanlı İmparatorluğu'ndan 14.000 km'si bozuk ve bakıma muhtaç durumda olan 18.365 km'lik karayolu ağı devralmıştır. Cumhuriyetin ilk yıllarında demiryolu yapımına ağırlık verilmesi ile 1950'li yıllara kadar karayolu ağında kayda değer bir iyileştirme olmamıştır. Bu dönemde çıkarılan Yol Kanunu ile Nafia Vekaleti bünyesindeki Şose ve Köprüler Reisliği'nin çalışmaları olmuşsa da

dünya ekonomisindeki durgunluk, ayrıca 2. Dünya Savaşı'nın getirdiği sıkıntılar sonucu yeterli mali kaynak ayrılamamış olması, bu dönemde karayolu yapımında gelişmeyi önlemiştir.

Karayolu altyapısında görülen sıçrama, konuya yeni bir bakış açısı ile yaklaşılması ve 1 Mart 1950 tarihinde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kurulması ile başlamıştır. İlk dönemlerde “tekerlek dönsün” düşüncesi ile kısa sürede büyük yerleşme merkezlerinin birbirlerine bağlanması amaçlanmış, kazma-kürek yani insan gücü ile inşaat yerine makineli inşaatın öne çıkması sonucu kısa sürede büyük başarılar ulaşılmıştır. Bugün mevcut olan devlet ve il yollarının büyük kısmı bu dönemde oluşturulmuştur. [11]

1970'li yıllarda ekonomide başlayan canlanma, ayrıca otomotiv sanayinin başlaması ile motorlu taşıt ve özellikle yük taşıtlarındaki hızlı artışın sonucu olarak, 1950'li yıllarda bir an önce erişilebilirliği sağlama düşüncesi altında, ayrıca kıt kaynaklarla oluşturulan yol ağında hem kapasite, hem de yapısal olarak yetersizlikler görülmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda İstanbul'da Boğaziçi Köprüsü ve Çevre Yolu işletmeye girmiş, yüksek standartlı yol olarak İstanbul-İzmit arasında ekspres yol inşaatı başlamıştır. 1980'li yılların başında hızla artan karayolu trafiğinin ülkemize getirdiği olumsuzluklar ve taşıma türleri arasındaki dengesizliğin gittikçe belirginleşmesi üzerine, ulaşım altyapısının bir plana bağlı olarak geliştirilmesini hedefleyen 1983-1993 Ulaşım Ana Planı hazırlanmışsa da plan uygulanma fırsatı bulamadan gündemden kalkmış ve otoyol ağırlıklı karayolu yapımı benimsenmiştir. Bugün itibariyle kullanımda 1.881 km otoyol bulunmaktadır. Bu konudaki son gelişme, gereksinim duyulan kesimlerde daha düşük maliyetli bölünmüş yolların yapılmasıdır. Hükümet karayolu ağındaki 15.000 km'lik kesimi bölünmüş yola dönüştürmeyi planlamış olup bunun 1.600 km'lik kısmının tamamlandığı ifade edilmektedir.

Konuya taşımacılık açısından bakıldığında, daha önce de vurgulandığı gibi, karayolu taşıması pek az ülkede rastlanabilecek şekilde çok etkin olmasına karşılık, gerek yolcu ve gerek yük taşımacılığında verim düşüktür. Kapasite fazlalığı vardır. Trafik güvenliği zayıftır. Bunun önde gelen sebeplerinden biri, taşımacılıkta kurumsallaşmanın özellikle yük taşımacılığında olmak üzere çok düşük düzeyde olmasıdır. Kamyoncu esnafının hakim olduğu bu sektörde, taşımalar gelişmeyi

önleyici yıkıcı bir rekabet ortamında yapılmaktadır. Benzer durum yolcu taşımacılığında da söz konusudur.

Uluslararası yolcu ve yük taşımacılığının daha düzenli bir ortamda yapıldığı ifade edilebilir. Bunun sebeplerinden biri özellikle AB ülkelerine yapılan taşımalarda bu ülkelere kullanılacak taşıtlar, ayrıca sürücülerin çalışma koşulları hakkında birtakım standartların konmuş olmasıdır. Diğer önemli sebep ise, burada da firma sayısı ve taşıma kapasite fazlası olsa da, taşımacıların önemli kısmının kurumsallaşmış, ayrıca örgütlenmiş olmalarıdır.

Temmuz 2003’de yürürlüğe giren Karayolu Taşıma Kanunu’ndan, taşımacılık sektörünü disipline etme ve kurumsallaşmayı hızlandırma yönlerinde olumlu beklentiler vardır. Bu arada, uluslararası taşımacılıkta AB ile uyum çerçevesinde yapılması gerekenler olup bu yönde çalışmalar başlatılmış bulunmaktadır.

Aşağıda rijit üstyapı uygulamaları açısından önde gelen ülkelerde ve Türkiye’de rijit üstyapılara ilişkin tasarım, malzeme ve ülkeden ülkeye değişim gösteren inşaat metodları gözlemlenen bazı proje bölgeleri de göz önüne serilerek ele alınmıştır.

4.1 Fransa

1939’dan 1960’a kadar olan yıllarda birkaç kesimle başlamak üzere; rijit üstyapılar, Fransız otoyol sistemlerinin varoluşundan beri, kullanılmaktadır. Asıl gelişme, 1960’lı yıllarda, alt drenaj olmadan çimento ile stabilize edilen bir temel üzerine yerleştirilen kayma donatısı içermeyen derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıların, “California” tasarım yöntemi ile benimsenmesi üzerine başlamıştır. 1970’li yıllarda ağır trafiğin hızlı gelişimi; pompaja, derz detorasyonlarına ve plakta oluşan çatlakların ortaya çıkmasına ilişkin problemlere neden olmuştur (Fransa’da, California’nın güney ve merkez kesimlerine göre yağış miktarının kayda değer derecede fazla olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.). Bu tür problemler, Fransa’daki rijit üstyapıların itibarına zarar vermiştir ve kullanımlarını sınırlandırmıştır. [4]

Şuna da dikkat çekilmelidir ki; bununla beraber, bu üstyapılardan birkaç tanesi, ağır trafik altında hala hizmet verebilmektedir. Örneğin 1960 yılında inşa edilen, Paris’teki ağır trafiğe sahip A-6 otoyolu Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1: Paris'in güneyinde yer alan, 40 yaşındaki A-6 otoyolunun derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı kesimi (Genişletilmiş sınırla eklenen şerit dikkat çekmektedir.) [4]

Göz önünde bulundurulması gereken unsur, derzli-donatısız rijit üstyapı tipindeki bu üstyapıların çoğu zaman orijinal tasarım trafiğini taşıyabildikleri ve gerçekten oldukça iyi bir performans gösterdikleridir. Örneğin; kayma donatısız, drenajsız derzli-donatısız tipte üstyapıya sahip kesim, rehabilite edilmeden 12 yılın üzerindeki bir süre aralığı boyunca 17 milyon ağır ticari taşıtı taşıyabilmiştir. (Yasal tekil-dingil yükü 13 tondur)

Ayrıca; diğer Avrupa ülkelerinde olduğu gibi Fransa'da da kalite seviyesinin hiçbir zaman kabul edilebilir düzeyde olmadığı varsayılmaktadır ve bu tasarımın geliştirilmesi için sürekli çaba harcanmaktadır. Yıllardır Fransız mühendisler, araştırmacılar, yükleniciler ve sanayi; rijit üstyapıların tasarım, malzeme ve inşasının geliştirilmesi için yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar. Yoğun ve ortak çalışmaların sonucunda birçok yeni tasarım benimsenmiştir.

Toplamda 900 km'lik otoyol, 200 km'lik kaplamayı içeren rijit otoyollar, Fransız otoyol ağının %15'ini meydana getirmektedir. Rijit üstyapılar; aynı zamanda ikincil yollarda ve havaalanlarında da kullanılmaktadır. Bu pay sabit hızla büyümektedir. Şu anda her yıl, Fransız otoyol ağında inşa edilen üstyapıların %30'unu rijit üstyapılar meydana getirmektedir.

Daha önceki üstyapıların tamamı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılarla inşa edilmekteydi ve bu tip üstyapılar bazı modifiye edilmiş tasarımlarla hala inşa edilmektedir. Bununla birlikte; Fransa'nın belirli bölgelerinde sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılar gittikçe popüler hale gelmektedir. Fransa'da sürekli-donatılı tipteki ilk rijit üstyapı 1983 yılında inşa edilmiştir ve bugün Fransa bu tipteki rijit üstyapı ile inşa edilmiş 550 km'lik otoyollara sahiptir. Sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıların 100 km'nin üzerindeki bir kısmı, mevcut beton ve asfalt karayollarındaki kamyon şeritlerinin yeniden inşa edilmesi amacıyla yönelik olarak inşa edilmiştir.

4.1.1 Fransa'daki Ücretli Yol Şirketleri

Fransa'daki otoyollara en önemli bakış açılarından biri; 6000 km'lik büyük otoyolları inşa edip işleten, ücretli yol inşa eden sekiz şirkettir. Bunlardan yedi tanesi; %50'si devlete ait olmak üzere yarı özeldir ve bir tanesi ise tamamen özeldir (Mülkiyeti birkaç yükleniciye aittir).

Bu şirketlerin kullanıcılara en iyi kalitedeki servisi sağlama ve hizmet düzeylerini geliştirmedeki sürekli çabaları çok dikkat çekicidir. Yolu kullanan sürücüler ile; üstyapı koşulları, güvenlik ve çeşitli hizmet alanları ile ilgili geri bildirim araştırmaları yapmaktadırlar. Bu nedenle üstyapı tasarımlarını, hem maliyet hem de servis kalitesini göz önüne alarak seçerler. Yüksek kaliteli üstyapılar düzgün, düşük gürültülü bir yüzey ve sürüş güvenliği anlamına gelmektedir. Mükemmel durumdaki üstyapı koşullarının sürdürülebilmesi için gereken bakım ve düşük bakıma ihtiyaç duyan, uzun hizmet ömrünü sağlayacak genişletme ile üstyapı inşaatı için gerekli fonlar mevcuttur. Bu tür üstyapıların bakımı, ücretli olmayan yollardaki üstyapılara göre daha iyi koşullarda iken yapılır.

4.1.2 Tasarımlar

Üstyapıların standart tasarımına ilişkin geniş kapsamlı bir tasarım katalogu 1988 yılında Fransa'da yayımlanmıştır. Bu katalog, trafik düzeyine ve temel şartlarına göre belirlenmiş alternatif tasarımlar ortaya koymuştur. Fransa, rijit üstyapıların genel iki tipinin tasarımını ve inşaatını yapmaktadır: derzli-donatısız ve sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılar.

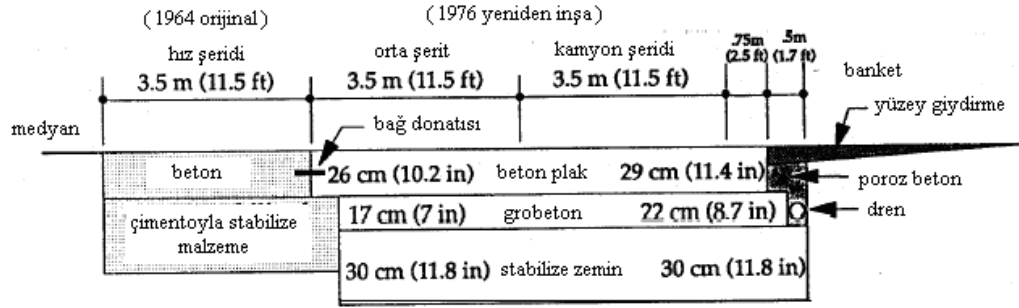
4.1.3 Önceki Derzli-Donatısız Tipteki Rijit Üstyapı Tasarımı

1960'lı yıllarda derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıların tasarımında iki büyük kusur mevcuttu. Bu tasarım derzlerde yeterli yük transferini içermiyordu ve alt drenaj olmadığı için enkesit bir banyo küveti durumundaydı. Çok ağır olan kamyon dingil yükleri (13tonluk tekil-dingil yükü), çok fazla yükleme sayısı ve California'dan daha yağışlı olan bir iklim bu üstyapılarda pompaja, faylanmalara (kırıklanmalar) ve daha sonra çatlamalara neden olmuştur.

4.1.4 Derzli-Donatısız Tipteki Rijit Üstyapı Tasarımında Modifikasyonlar

Sözü edilen problemlerin önüne geçilebilmesi için, yıllar boyunca tasarımda büyük değişiklikler yapılmıştır.

- Enkesit, trapezoidal kesite modifiye edildi. Böylelikle, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi beton malzeme miktarı ve maliyet artmadan, yolun dış tarafındaki kamyon şeridinde plak kalınlığı artırılmıştır. Sınır boyunca yüksek eğilme gerilmelerine ve yüksek köşe defleksiyonlarına neden olan yük dalgalanmalarına engel olmak için kamyon şeritleri genişletilmiştir.



Şekil 4.2: Yeniden inşa edilen trafik şeritlerinin tasarımında Fransız trapezoidal enkesit örneği. [9]

- Plağın altına, erozyona karşı dirençli düşük dozajlı betondan yapılmış bir temel yerleştirildi ve derz sınırları boyunca çeşitli tipteki boyuna drenaj elemanları yerleştirildi.
- Kayma donatılarının, daha kısa derz aralıklarının (4m'den 5.5m'ye kadar) ve daha kalın bir plağın kullanımıyla enine derzlerdeki yük transferi iyileştirildi.

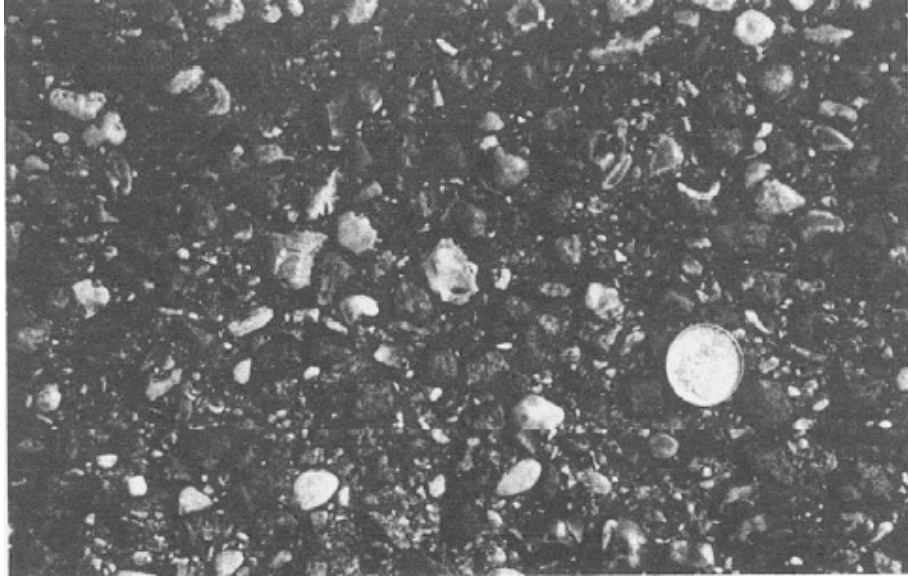
Fransa’da olduğu gibi bir çok ülkede seçilmiş olan bazı projeler hariç, bu üstyapılar kayma donatısı olmaksızın inşa edilmişlerdir.

- Yukarıda sözü geçen derzli-donatısız tipteki üstyapı tasarımları yeni inşalarla birlikte büyük otoyolların mevcut şeritlerinin yeniden inşasında kullanılmaktadır. Örneğ olarak; kayma donatısız ve drenajsız olarak inşa edilmiş olup, tek bir şeritte 17 milyon ağır kamyon taşıyan ve 12 yıl sonra rehabilitasyon gerektiren A1 otoyolu verilebilir.

1976 yılında bu üstyapı şekil 4.2’de gösterildiğı gibi kısmen yeniden inşa edilmiştir. Bu yeni üstyapı en ağırlık şekilde yüklenen şeridinde 35 milyon kamyonu veya tasarım trafiğinin iki katından fazlasını 1988 yılına kadar taşıyabilmiştir. 1988 yılında alt drenaj sistemi tamamen tıkanmış olarak bulununcaya kadar, bu üstyapıda pompaj gittikçe gelişmiştir.

Derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıya diğere bir örneğ ise, kısa derz aralıklı (4.5 m), taban zemini üzerine bir geotekstil dren yerleştirilerek, alttemelsiz olarak 1978 yılında inşa edilen 39 cm kalınlığındaki kalın bir plaktır. Bugün bu üstyapı hala çok iyi performans göstermektedir. Fransa, günde 1500 kamyonundan az trafiğere sahip bir yol için bu tasarımın iyi olduğuna düşünmektedir.

Fransa’da üstyapılar ile ilgili dikkate alınan önemli bir konu aşınma yüzeyidir. Gürültünün azaltılması, sürtünme direncinin arttırılması ve su kızığının azaltılabilmesi için; taze beton üzerine agrega (mıcır) dökülmesi, ortaya çıkarılmış agrega yüzey, poröz asfalttan yapılma ince bir yüzey tabakası, ince çift tabakalı yüzey iyileştirmeleri ve bazı poröz beton yüzey uygulamalarını içeren birçok tipte yüzey inşa edilmiştir.



Şekil 4.3: Fransa’da ortaya çıkarılmış bir agrega yüzeyin fotoğrafı. [14]

Derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı derzlerinde, sıcak dökülen polimerize asfalt ve önceden biçimlendirilmiş derz dolgu malzemeleri kullanılır. Plak sınırından uzakta olan soldaki tekerleklerin önce derze vurması için, genellikle derzler saat yelkovanının tersi yönünde (sola doğru) 1:6 derecede verevlenir.

4.1.5 Sürekli-Donatılı Tipteki Rijit Üstyapı Tasarımı

Plak kalınlığının tasarımı; mevcut kamyon trafiğine ve taban zemini modülüne göre değişim göstermektedir. Sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapının altına direk olarak 15 cm’lik zayıf betondan bir temel yada 5 cm’lik bir asfalt betonu tabaka kullanılır. Ayrıca bu temel tabakasının altına genellikle seçilmiş granüler malzemeden kalın bir tabaka yada çimento ile stabilize olmuş bir zemin yerleştirilir. Bir otoyolda toplam kaplama genişliği 8 m’dir ve dış taraftaki iki trafik şeridi 0.5 m’lik genişletmeleri içermektedir. Birçok karayolunda bağlanmış beton banketler (bazen zayıf betondan yapılmış yapılar) gözlemlenmiştir. Bazı sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılar, iki şeridin bir tarafından diğer tarafına doğru kalınlığı değişen trapezoidal enkesitlerle inşa edilmişlerdir. Bazı örnekler:

- **Yeni otoyol üstyapıları:** 19 cm’den 25 cm’ye kadar (Daha fazla kamyon trafiğinin görüldüğü bölgelerde plak kalınlığını arttırıldığı gözlemlenmiştir.)
- **Kamyon Şerit Genişletmesi:** Genellikle 31.5 cm olduğu gözlemlenmiştir.

- **Eski Derzli-Donatısız Rijit Üstyapı Üzerine Yerleştirilen Kaplama:** Minimum 18 cm
- **Eski Asfalt Betonu Üzerine Yerleştirilen Kaplama:** Minimum 16 cm.

590 Mpa'lık akma dayanımlı, nervürlü boyuna donatılar kullanılmaktadır. Donatı yüzdesi %0.67'dir ve çatlakların dar tutulması için donatı plak kalınlığının 1/3'lük (8 cm) derinliğine yerleştirilirler. Bu tasarım çok dar çatlaklarla ve çok az zımbalama etkisiyle (punchout) sonuçlanır. Aynı zamanda, şeritleri beraber tutmak için enine donatı da kullanılır. Her metreye bir çubuk (1-1.4 cm çaplı) yerleştirilir.

Banket; eski agregalı asfalt beton temele yada poröz beton temele veya örülmemiş geotekstil drenaj tabakası üzerine yerleştirilmiş bağlanmış zayıf beton temele sahiptir. Erozyonun önlenmesi amacıyla, plak sınırı boyunca drenaj sağlanmıştır.

Fransızlar, köprülerdeki sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıların uç noktalarını iyileştirilmesi konusu hakkında birçok çözüm yolu sunmuştur: genişleme (dilatasyon) derzlerinin sağlanması, yüksek aderansın sağlanması için temel yüzeyin pürüzlendirilmesi veya köprü tasarımı ekstra ölü yüklere yapılmışsa sürekli-donatılı rijit üstyapının direk olarak köprü tabliyesi üzerine yerleştirilmesi.

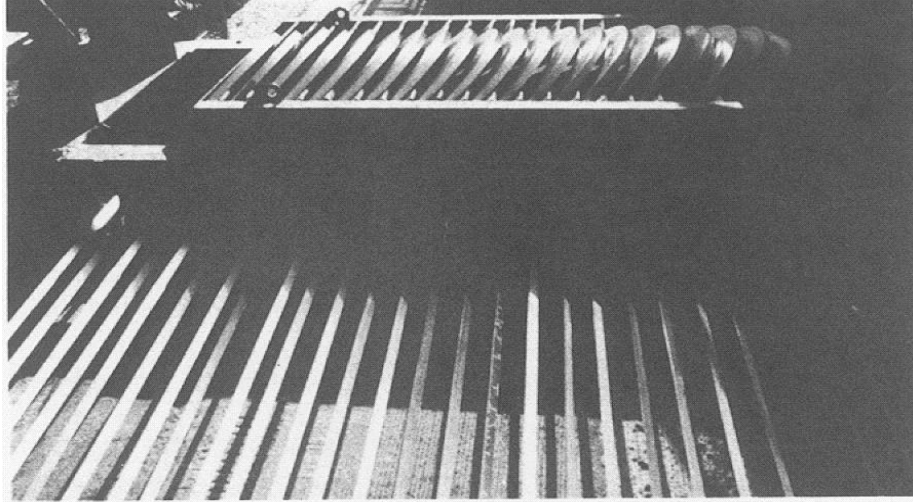


Şekil 4.4: Fransa'da mevcut asfalt üstyapıya eklenmiş, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı ile inşa edilmiş kamyon şeridi. [4]

4.1.6 Sürekli-Donatılı Rijit Üstyapı İçin Yeni Donatı

İnşaat zincirinin uzunluğu ve donatı çubuklarının yerleşiminin kompleksliği nedeniyle; halka şeklinde kıvrılabilen donatıların, inşaat zincir uzunluğu ve donatının

bağlanması için gereken iş gücünü azaltabilme yeteneği göz önünde bulundurulmuştur. Halka şeklinde sarılarak kullanılan bu tip donatıların bir fotoğrafı Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5: Fransa’da geliştirilen, halka şeklinde sarılabilen dikdörtgen donatı. [4]

Fransa’da yapılan araştırmalar, çatlakların dar tutulabilmesi için beton ile donatı arasındaki aderansın çok kritik olduğunu göstermiştir ve aderansın artırılması için betonla temasın olabildiğince geniş tutulabildiği yüzeylere sahip donatıların geliştirilmesi düşüncesini ortaya çıkarmıştır. Bu durum inşa ve taşınma kolaylığına ve halka şeklinde sarılabilme avantajına sahip, yassı donatılara yönelime sebep olmuştur. Sonuç, betonla yüksek aderansa sahip ve yüksek bir akma dayanımına sahip halka şeklinde sarılabılır şeritlerdir.

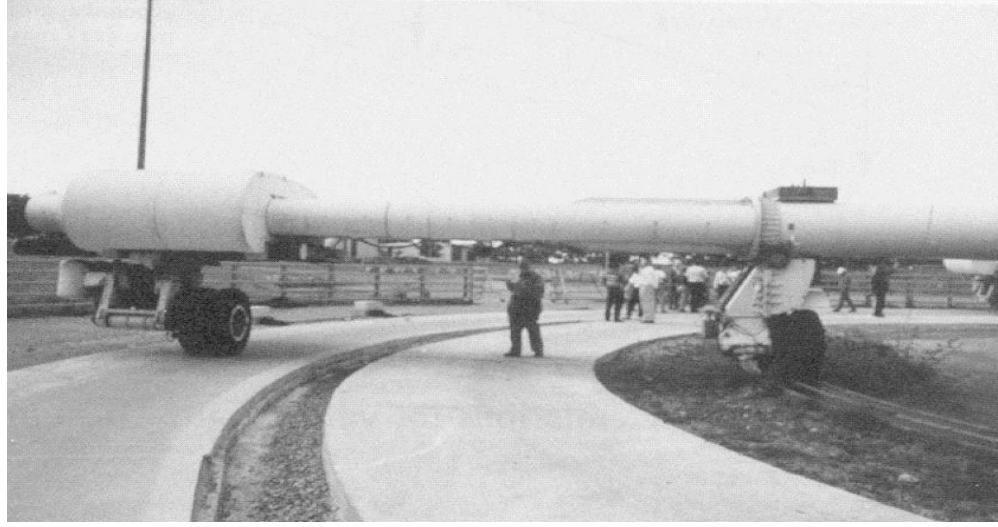
Bu donatılar, 1998 yılından beri FLEXARM ticari ismi altında birçok otoyol projesinde kullanılmaktadır. Bu karbon çeliği 790 MPa’lık akma dayanımına, 4 cm genişlikte, 2 mm kalınlıkta yassı-dikdörtgen bir kesite, dövülerek her iki kenarı oluklandırılmış ve sürekli sıcak galvaniz kaplama sayesinde korozyona dirençli bir yüzeye sahiptir. 360 veya 500 m’lik halkalarda bulunup sahaya ulaştırılırlar ve hızlı pnömatik (havalı) perçinleme ile sahaya katılırlar. Daha kısa çalışma alanı, arttırılmış inşaat verimliliği ve buna bağlı olarak çalışma süresinin azalması, sürekli-donatılı rijit üstyapının bir şeridini tek bir seferde kaplayabilme olanağı ve geliştirilmiş güvenlik avantajları kullanıcılar tarafından rapor edilmiştir.

4.1.7 LCPC- Nantes’da Yapılan Araştırmalar

LCPC-Nantes laboratuvarlarında rijit üstyapılar üzerine yapılan bir ulusal araştırma projesi, kamu ve özel kuruluşları (IREX) kapsamaktadır. Bu araştırmanın, fon harcamalarında en yenilikçi ve pratik sonuçların elde edilmesinde bir işbirliği modeli oluşturduğu gözlemlenmiştir. Araştırma başlıkları; tasarım, çatlak kontrolü, poröz beton ve silindirle sıkıştırılmış beton konularını içermektedir. Yapısal tasarımların geliştirilmesinde üç boyutlu sonlu eleman teknikleri kullanılmaktadır (CESAR).

Kalın poröz beton plak konsepti gelişim altındadır. Bu konsept; toplam kalınlığı 40 cm olan, serbest drenajlı beton tabaka ile kaplanmış bir poröz beton temel olarak tanımlanmıştır. Bu üstyapı tasarımı, trafik gürültüsünü büyük oranda azaltır ve kentsel alanlarda yağış suları için yağmur suyu haznesi gibi davranır. Bu tasarım kentsel karayolları ve caddeleri için oldukça umut vericidir. Fakat tıkanmaların önlenmesi için bakımın göz önünde bulundurulması gerekir.

LCPC-Nantes Test Pistleri, rijit üstyapılarla ilgili olarak elde edilen deneyimlerin ana bölümüdür. şekil 4.6’da görülen geniş test alanları ile bazı sonuçlar önceden tahmin edilebilmektedir. Üç ayrı pistte, rijit üstyapılar üzerine her ay 1 milyon yük uygulanabilmektedir ve test alanlarının bakımı yapılırken yeni kesimlerin inşaatı yapılabilmektedir. 8 t’dan 18 t’a kadar olan yükler tekil veya tandem tekerlek yükü şeklinde uygulanabilmektedir. Bu çalışmalardan elde edilen deneyimler; kayma donatılı veya kayma donatısız derzli-donatısız rijit üstyapılar, zayıf beton temel (bağlanmamış), agrega temel, drenaj için geotekstil bir tabaka ve zayıf betondan yapılan plak konularını içermektedir. Bazı kesimlerde çatlamlar meydana gelmiştir. Daha düşük dayanımlı, zayıf (düşük dozajlı) beton kesimlerde kayda değer yorulma çatlakları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6: Fransız LCPC-Nantes dairesel test alanları [4]

4.1.8 Özet

Rijit üstyapıların inşaatı, Fransa'daki ağır trafiğe sahip bazı otoyol ve havaalanlarında, 40 yıl önce başlamış ve bugün halen sürmektedir. Fransızlar, uzun yıllardır, rijit üstyapıların tasarımını inşaatını ve rehabilitasyonunu geliştirmek için çok yoğun çalışmalar yapmaktadırlar. Yük transfer yöntemleri, sürekli donatılı rijit üstyapılar için dikdörtgen donatı, alt drenaj, düşük gürültülü-yüksek sürtünme dirençli yüzey, şerit genişletme ve trapezoidal enkesit tasarımları gibi birçok yenilikçi fikirler bu yıllar boyunca geliştirilmiştir. Tasarım ve inşaat pratiğine gerçek etkisi olan araştırma programlarıyla elde ettikleri başarının üzerinde; kamu ve özel kuruluşların bir araya getirilerek yapılan, rijit üstyapılardaki olası problemlerin çözümüne yönelik çalışmaların büyük etkisi vardır.

Fransızlar, rijit üstyapı tekniklerine ilişkin bakım ve rekabet edebilirlik konularının başarısının, endüstri ile işletme otoriteleri arasındaki ortak çalışmaların sonucunda ortaya çıkan sürekli yeniliklere göre değişim göstereceğini belirtmişlerdir. Fransa'nın rijit üstyapı teknolojilerini geliştirmek adına yoğun çaba gösterdiği gözlemlenmiştir.

Rijit üstyapı seçimi, 25-30 yıllık bir periyot için yapılan hizmet ömrü boyunca toplam maliyet analizinin bir sonucudur. Rijit üstyapı, yerel agregaların kullanılabildiği beton ile inşa edilebildiği zaman; çoğunlukla asfalt betonundan daha ucuzdur.

Standart tasarım kataloglarında verilen üstyapılar eşdeğerdir ve aynı hizmet ömrünü sunarlar. Bununla birlikte, yapıda beklenenden önce oluşan çatlamları önlemek için gerekli bakım miktarı ve memnun edici yüzey özelliklerinin sağlanabilmesi farklılık göstermektedir. Rijit üstyapıların bir avantajı da daha az bakıma ihtiyaç duymalarıdır. Bu nedenle üstyapıların karşılaştırmasına ait genel analizlerde, bakım maliyetlerinin de göz önüne alınması gerekir.

Bugün Fransa’da, yeni rijit üstyapıların tasarımı yapılırken, yüzeyin sürtünme ve pürüzlülük karakteristiklerini geliştirmek için ortaya çıkarılmış agrega yüzey yöntemi başta olmak üzere, yüzey üzerine stone-mastic asfalt veya yüzey iyileştirilmesi yapılır. Paris’te çok az bir alanda kar görülür; bundan dolayı stone mastic asfaltta veya poröz asfaltta bozulma görülmez. Aynı zamanda, ortaya çıkarılmış agrega yüzeyli, iki tabakalı üstyapılar da iyi performans göstermektedir.

Fransız ücretli otoyollarının mühendislik felsefesi, kullanıcıya sağlamaya çalıştıkları yüksek kalitedeki hizmet nedeniyle çok etkileyicidir. Mükemmel kalitedeki üstyapılar göze çarpmaktadır.

Nantes LCPC araştırma laboratuvarı, iki sebepten dolayı rijit üstyapıdan uzun bir ömür (30 yıldan fazla) beklenebileceği belirtmiştir: trafiğe karşı mekanik direnç (tekerlek izi oluşumu yoktur ve yorulma çatlakları kontrol altındadır) ve çevresel etkenlere direnç gösterebilme yeteneği.

4.2 Avusturya

Avusturya 1940 yılından beri rijit üstyapılar inşa etmektedir ve inşa edilen rijit üstyapı tipleri derzli-donatısız ve derzli-donatılı tipteki rijit üstyapılardır. Avusturya’da bugün çoğunluğu 30 yaşını ve bazıları 50 yaşını geçmiş birçok üstyapı mevcuttur. Tablo 4.2 Avusturya’nın ana karayollarında rijit üstyapıların boyutlarını göstermektedir. [4]

Tablo 4.2: Avusturya karayollarının üstyapı tiplerine göre yol uzunlukları. [4]

Üstyapı Tipi	Km	Yüzde
Asfalt Betonu	834	54
Rijit	698	46
Toplam	1532	100

Bununla birlikte; daha eski üstyapılarda, çivili tekerlek lastiklerinin 2-3 mm'lik tekerlek izlerine sebep olmaları nedeniyle, Avusturya çeşitli rehabilitasyonların uygulanmasını gerektiren birçok kesime sahiptir. Çivili tekerlek lastiklerinin rijit üstyapılara verdiği zararın onarılması amacıyla, birçok eski üstyapının kamyon şeritlerinin üzerine ince bir polimerize asfalt tabaka konur. Ancak bu tabakanın ömrü sadece 4-6 yıldır.

4.2.1 Tasarımlar

Avusturya'da 30 yıllık bir periyot için üstyapı tasarımlarını içeren bir katalog bulunmaktadır. Dört farklı tasarım göz önünde bulundurulmuştur: işlenmemiş granüler temelli veya çimento ile işlenmiş temelli, kayma donatılı ve kayma donatısız tasarımlar. Mevcut tasarım kalınlıkları şöyle sıralanabilir:

- 18-22 cm derzli-donatısız rijit üstyapı (ağır trafik için 25 cm)
- 5 cm'lik asfalt betonu ara tabaka
- 20-45 cm; %3'den daha az ince tane içeren işlenmemiş granüler tabaka

Veya

- 18-22 cm derzli-donatısız rijit üstyapı
- 5 cm'lik asfalt betonu ara tabaka
- 18-20 cm çimento ile işlenmiş temel (sadece son 5 yıldır kullanılmaktadır.)

Tasarım kataloglarındaki kalınlık değerleri, sahada yapılan plak yükleme testi ile elde edilen taban zeminin minimum taşıma kapasitesine ve kabul edilebilirlik limiti olarak tanımlanan Avusturya Şartnamesi RVS 8.24'e göre belirlenmiştir. Minimum taşıma gücü değeri 35 Mpa'dır. Eğer zemin bu taşıma gücü değerini karşılayabilecek düzeyde değilse, gerekli taşıma kapasitesinin elde edilebilmesi için zemin stabilizasyonu, kalitesiz zeminin daha iyi kalitedeki malzemelerle değiştirilmesi veya diğer metotlar kullanılır. Asfalt ve rijit üstyapılar için belirlenen minimum taşıma kapasitesi aynıdır. Avusturya'daki minimum don derinliği 1,5 m'dir.

25 cm 'lik bir plak için tipik derz aralığı 6 m'dir. Kayma donatıları 2,6 cm çapında ve 50 cm uzunluğundadır. Daha ağır trafik için, maksimum derz aralığı "25 T" dir. (T: plak kalınlığı- mm) Böylelikle, 25 cm'lik bir plak için maksimum derz aralığı 6,25 m'dir.

Enine derz kırılmalarının kontrolü gerekli kayma donatılarıyla iyi bir şekilde kontrol altına alınmıştır. Avusturya, korozyonun önlenmesi için kayma donatılarının kaplanması gerektiğini savunmuştur. Daha önceki bazı projelerde, kayma donatıları kaplanmamıştır ve bunun sonucunda ciddi boyutta korozyon görülmüştür.

1970'li yılların sonunda, ülkenin bazı bölgelerinde dolgu uygulamaları değişmiştir. Enine ve boyuna derzler testere ile 3 mm genişlikte kesilmeye başlanmış ve derzler doldurulmamaya başlanmıştır. Bu uygulama ile yapım maliyeti %10 kadar azalmıştır. Bu uygulama hakkında bazı tartışmalar mevcuttur; çünkü, bazıları derzlerin doldurulmasının üstyapı ömrünü arttırdığını düşünmektedir ve bazı projelerde bugün bile dolgu kullanılmaktadır.

Derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı kalınlığının içinde olan, daha küçük taneli, sağlam agregalı 4 cm'lik bir tabaka düşük gürültülü, yüksek sürtünmeli bir doku sağlamaktadır. Yüzey agregaları inşa sırasında ortaya çıkarılmaktadır. Köprü tabliyeleri ve tünellerdeki üstyapı tasarımları da aynı zamanda tasarım kataloglarında verilmiştir.

Tüm kaplama genişliği 11,5 m'dir; 4,75 m iç şerit ve dar banket, 3,75 m dış şerit ve 3 m'lik bağlanmış banket. Eski üstyapılarda enine eğim % 1,5'tir, ama şu andaki tüm yeni üstyapılarda % 2,5'tir.

4.2.2 Gözlemlenen Proje Bölgesi

Yakın zamanda tamamlanan ve inşaat halindeki iki proje gözlemlenmiştir. Bunlar Vienna ile Salzburg'u birbirine bağlayan A1 otoyolu üzerindedir. Bu 300 km'lik karayolu, ağır trafiğe sahip bir batı-doğu karayoludur. Tamamı 30 yıl önce derzli-donatılı tipteki rijit üstyapı ile inşa edilmiştir ve bazı kesimleri ise 40 yılı aşkın bir süre önce inşa edilmiştir.

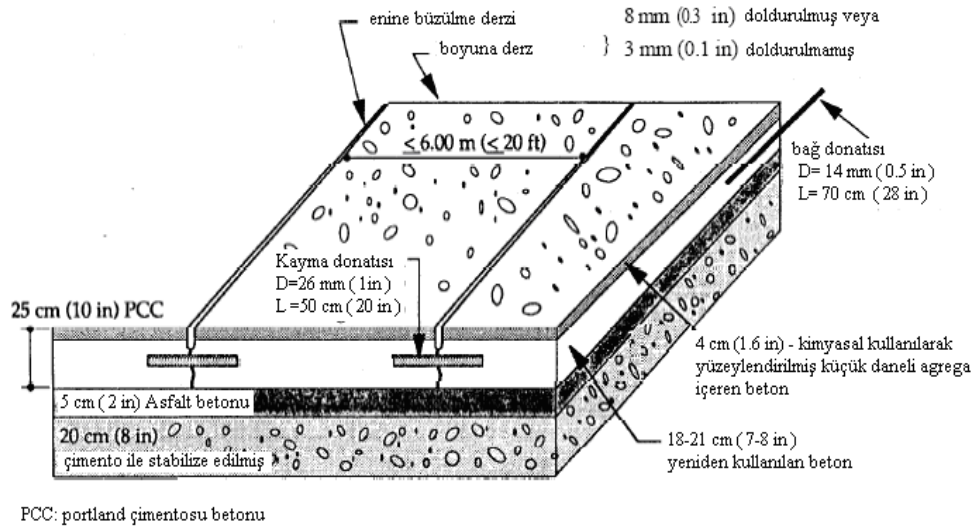
4.2.2.1 A1 Otoyolu-Bağlanmamış Rijit Üstyapı

Önceki tasarım metoduyla 1957 yılında inşa edilen derzli-donatılı tipteki rijit üstyapı; 24 cm'lik bir plak ve agrega bir temel üzerine 3 cm'lik bir kum tabakadan oluşmaktaydı. Eski plak çatlatılmış ve oturtulmuştur. 5 cm'lik bir asfalt betonu yerleştirildikten sonra 20 cm'lik derzli-donatısız rijit üstyapı yerleştirilmiştir.

4.2.2.2 A1 Otoyolu-Geri Kazanma ve Yeniden Yapım

Kısmen asfalt betonu içeren önceki derzli-donatılı rijit üstyapı bir “Wirtgen Giyotini” kullanılarak parçalanmış, bir kırma plentine taşınmış ve bir dizi işleminden geçirilerek tanelere ayrılmışlardır. Bu parçalar %2 ile %10 arasındaki oranlarda, geri kazanılan rijit üstyapının içerdiği ince asfalt yüzeyden gelen, asfalt betonu içermektedir. 0-3 mm arası ince taneler, %15 oranında ince tane içeren eski granüler alt temel üzerine yerleştirilir ve daha sonra bir Bomag makinesi kullanılarak 20-25 cm derinliğinde çimento ile yerinde stabilize edilir. 7 günlük gerekli basınç dayanımı 7 Mpa olarak belirlenmiştir. Erozyona karşı direnç gösterebilen bir temele sahip rijit üstyapının elde dileyebilmesi için, 5 cm’lik asfalt betonu tabaka (bu tabaka geri kazanılmış asfalt betonu malzemesi içermektedir) çimento ile stabilize edilmiş tabakanın üzerine yerleştirilmiştir.

Daha sonra bir kayar-kalıp kullanıcısı kullanılarak; 25 cm kalınlıkta, 5,5 m aralıkla derzlendirilmiş, kayma donatısına sahip derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı yerleştirilmiştir. 26 mm çapında, 50 cm uzunluğunda plastikle kaplanmış kayma donatıları kullanılmıştır. Enine derz aralıkları 6m’den küçük tutulmuştur. Büzülme derzleri 3 mm genişlikte kesilmiştir ve doldurulmadan bırakılmıştır. Bununla birlikte derz genişliklerinin 8 mm olanları da gözlemlenmiştir ve bunlar bitümlü dolgu malzemesi ile doldurulmuştur. Kaplama genişliğinin 11,5 m olduğu, tamamlanmış bir üstyapı enkesiti Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7: Avusturya’da A1 otoyolunun yeniden inşasında kullanılan derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı enkesiti [9]

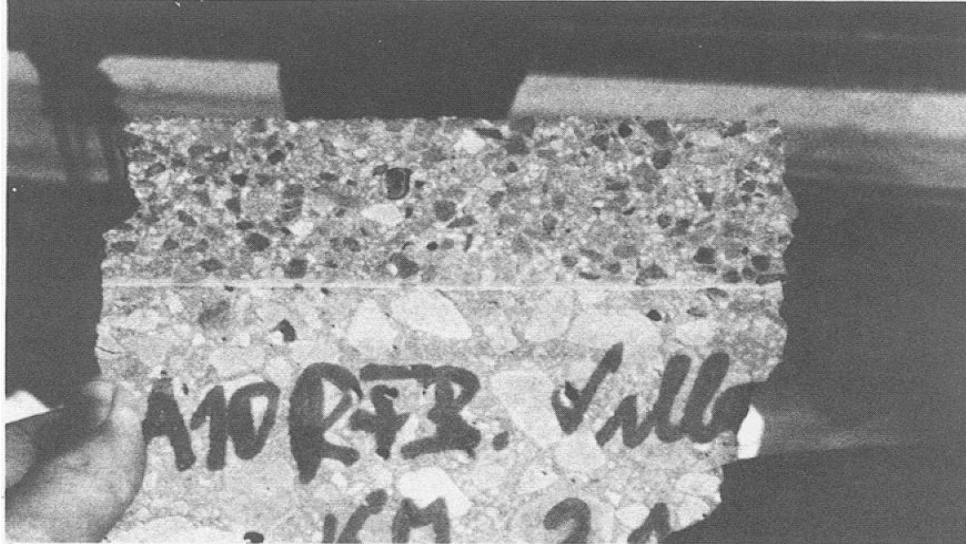
Plak iki tabakalı olacak şekilde inşa edilmiştir; geri kazanılmış betondan oluşan bir alt tabaka ve düşük gürültü, yüksek sürtünme sağlayan yüksek kaliteli ve sağlam agregalı bir üst tabaka (Şekil 4.8). Plak; “çift tabliyelı” modifiye edilmiş bir Wirtgen kayar-kalıp kaplayıcısı ile iki tabaka halinde yerleştirilir. Monolitik bir yapının oluşturulabilmesi için, bu kaplayıcı iki ayrı tabakayı beton taze formdayken aynı anda üst üste yerleştirir. Çift tabakalı kit ile birleştirilmiş SP1600 Wirtgen kayar kalıp kaplayıcısı şu işlemleri uygular:

Alt tabaka (21 cm) :

- Tüm genişliğe (11,5 m) beton üst tabakayı püskürtür
- Alt tabakayı sıvılaştırır ve sıkıştırır.
- Master çekerek alt tabakayı şekillendirir
- Enine derzlere kayma donatılarını yerleştirir
- Boyuna derzlere bağ donatılarını yerleştirir ve
- Kayma donatıları ve bağ donatıları yerleşim işleminden sonra; alt beton plağın yüzeyi ilk salınım kirişi ile eski haline getirilir.

Üst tabaka (4 cm) :

- Üst tabaka betonu mikser kamyonundan, kaplayıcının ana çerçevesi üzerine taşınır ve dağıtma burgusundaki besleme hunisi içine boşaltılır.
- İkinci tabaka yüksek frekanslı vibrasyon sistemiyle (vibrasyon; alt tabakada ek bir vibrasyonun oluşmasını önlemek için, frekans olarak kontrol altındadır.) sıvılaştırılır ve sıkıştırılır.
- Master ile üst tabaka şekillendirilir
- İkinci salınım kirişi ile ve süper tesviye edici ile üst tabaka dokulandırılarak işlemler sona erdirilmiş olur.



Şekil 4.8: Avusturya’da iki-tabakalı konsepte göre inşa edilmiş beton plak. [4]

21 cm’lik alt tabaka, geri kazanılmış kırma beton ve buna ek olarak doğal kum içermektedir. Çimento içeriği 360 kg/m^3 ’tür ve sürüklenmiş hava mevcuttur. 28 günlük eğilme dayanımı 6,5 Mpa ile 9,5 Mpa arasında değişmektedir.

Üstteki 4 cm’lik tabaka yüksek bir yüzdede, maksimum tane boyutu 8 mm olan sağlam kaya agrega ve %35 oranında kum (0,1 mm) içermektedir. Çimento içeriği 450 kg/m^3 ’tür. Karışım %4 oranında sürüklenmiş hava, plastikleştirici (akışkanlaştırıcı), geciktirici içermektedir. Durabilite ile düşük rötre özelliklerinin sağlanabilmesi için kullanılan su/çimento oranı 0,38’dir.

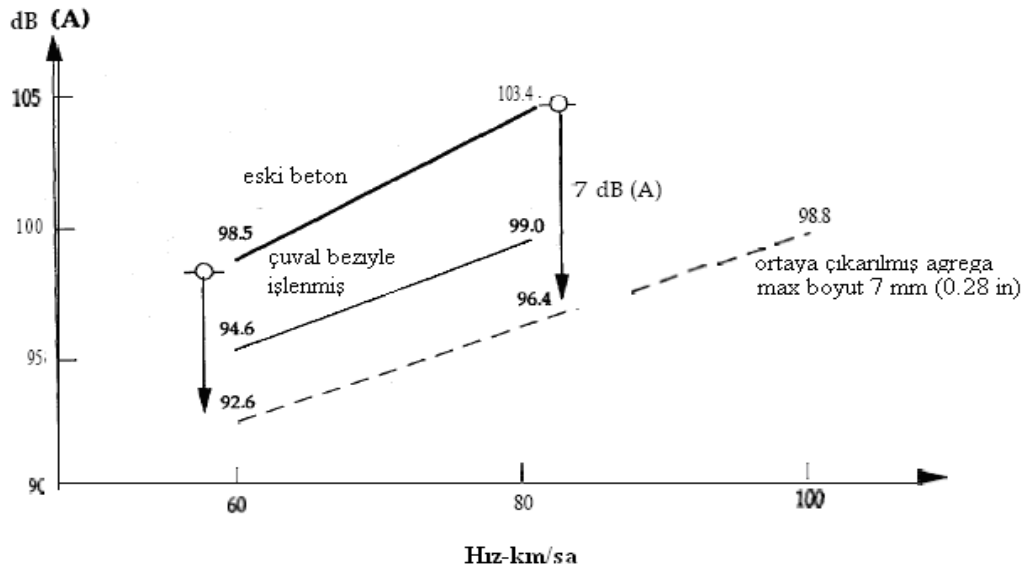
Üst tabakanın, alt tabakadan daha çabuk bir şekilde sertleşmesini önlemek için bir priz geciktirici kullanılır. Kaya agregaları (4-8 mm); 19’den daha küçük LA aşınma değerine ve 50’den büyük bir cilalanma değerine sahiptir. Beton yüzeyine bir geciktirici püskürtülüp plastik kaplama ile örtülür veya film-form kür bileşenleri yüzeye püskürtülerek buharlaşma önlenir. Ertesi gün, agregaların ortaya çıkarılması için yüzey fırçalanır ve kür bileşenleri püskürtülür. Kum yama test yöntemi ile ölçülen doku derinliği 0,9 mm’dir.

Pürüzlülük şartları profilometre kullanılarak uygulanır. Derz kesimleri, plastik kaplama sırasında yapılır.

Beton kırma ve daha düşük maliyetli geri kazanılmış beton malzeme üreten tesis incelendiğinde, beton karışımında yaklaşık olarak %10 oranında asfalt betonu içeriğinin olduğu görülmüştür. Şartnameler %20’ye kadar izin vermiştir fakat bu aşırı

miktarda çimento gerektirmektedir ve bu da ekonomik olmamaktadır. Alt tabakada kaba (iri taneli) agregası olarak sadece geri kazanılmış beton kullanılmaktadır.

Şekil 4.9'da; eski beton yüzey (enine-dişlendirilmiş), çadır bezi ile dokulandırılmış ve ortaya çıkarılmış agregası yüzeylerinin gürültü açısından değerlendirildiği Avusturya'da yapılan ses emisyonu grafiği görülmektedir. Bunlar ve diğer veriler eski betonun en yüksek ses emisyon düzeyine sahip olduğunu göstermiştir ve poröz asfalt, ortaya çıkarılmış agregası ile epoksi/ince agregası yüzey giydirme iyileştirmelerinin benzer olduğunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.9: Avusturya'da çeşitli yüzeylendirmeler için ölçülen ses emisyon grafiği. [14]

4.2.3 Özet

Avusturya 1950'li yıllardan itibaren ağır kamyon trafiği altında çok iyi performans gösteren birçok derzli-donatısız ve donatılı rijit üstyapılar inşa etmektedir. Çivili tekerlek lastiklerinin kamyon şeritlerinde meydana getirdiği zarar, kamyon şeritlerinde ince, polimerize asfalt betonu tabakaların yerleştirilmesini gerektirmiştir. Eski üstyapılar mükemmel beton durabilitesine sahiptir.

Yeni veya yeniden inşa edilmiş olan üstyapılar için mevcut tasarım; rijit banketlerle bağlı, kısa aralıklarla derzlendirilmiş kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar ve plak ile granüler veya çimento ile işlenmiş temel arasındaki asfalt betonu tabakadan ibarettir. Rehabilitasyon, faylanmış (kırılan) plakların üzerine

bağlanmamış derzli-donatısız tipteki rijit kaplamaları ve asfalt betonu kaplamaları içermektedir. Bugün yaygın olarak en çok kullanılan teknik eski bir üstyapının geri kazanılarak 11,5 m genişliğinde yeni bir üstyapı elde edilmesidir.

Avusturya'daki karayollarında gürültü seviyesinin azaltılması çok büyük önem taşımaktadır. Ortaya çıkarılmış agrega yüzey ile birlikte iki tabakalı (üst tabaka küçük ve sağlam agrega içermektedir) plakların kullanımı ile gürültü değerinde kayda değer bir azalma ve yüksek sürtünme elde edilebilmektedir.

Avusturya Çimento Araştırma Enstitüsünden, Dr. Sammer bir şeyin yürürlüğe konulması için gereken çabanın, önceki araştırma çabalarından daha büyük olması gerektiğini ifade etmiştir. Araştırmacıların prosedürler geliştirilinceye kadar saha yürütmelerine rehberlik etmelerinin yararlı olacağına inanmaktadır.

4.3 Almanya

Almanya 1920'li yıllardan beri, daha çok otoyol sistemlerinde ve havaalanlarında olmak üzere, birçok rijit üstyapı inşa etmiştir. Berlin'de otobüs duraklarının rijit üstyapılar kullanılarak inşa edildiği gözlemlenmiştir. Oldukça bozuk ve büyük rehabilitasyon altında olmalarına rağmen, orijinal rijit üstyapılar bugün ağır trafiği taşıyabilmektedirler. 50 yıl boyunca hiç bakım yapılmaması bu rijit üstyapıları kötü koşullarda bırakmıştır ve Almanya; ekonomik gelişimlerinde hayati önem taşıdığına inandığı karayollarını, ülkenin her yerine bağlantı sağlamak için, yeniden inşa etme adına büyük gayret göstermektedir. [4]

Şekil 4.10'da Münih'ten Berlin'e yaklaşırken, otoyolun bir kesimindeki 50 yaşını geçmiş olan bir derzli rijit üstyapı görülmektedir.

Almanya'da 10900 km'lik otobanların yaklaşık olarak 4168 km'si rijit üstyapılarla inşa edilmiştir. 1970 yılından önceki üstyapılar derzli-donatısız ve derzli-donatılı tipte inşa edilmiştir. 1970 yılından sonra ise, sadece kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar inşa edilmiştir. Almanya'da; buzlanmayı önleyici tuzların kapsamlı olarak kullanımının getirdiği, donatılı rijit üstyapılarda potansiyel korozyon etkisi nedeniyle, kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar benimsenmiştir. Yıllar geçtikçe Almanların rijit üstyapı tasarımı oldukça değişmiştir. Bununla birlikte mevcut derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı; 1970'li yılların

başından itibaren, hem yeni üstyapıların inşaatında hem de eski rijit üstyapıların kaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Berlin yakınlarında 1930’lu yıllarda inşa edilen Alman otobanı rijit üstyapısı. [4]

Rijit üstyapıların malzeme, inşaat ve tasarımının geliştirilmesi için “Ulusal Karayolları Araştırma Enstitüsü (Federal Highway Research Institute-BAST)” ve “Münih Teknik Üniversitesi” tarafından kapsamlı bir araştırma ve geliştirme programı Almanya’da sürdürülmektedir. Birçok mükemmel teknik makale, bu araştırmalardan elde edilebilmektedir.

Almanya’da, rijit üstyapılar havaalanlarında da kullanılmaktadır. Örneğin; 1992 yılının mayıs ayında hizmete açılan 2 milyon m²’den daha fazla alana sahip olan Münih II Uluslararası Havaalanı’nın pistleri, taksi yolları ve apronları 36 cm’lik kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılarla inşa edilmiştir.

4.3.1 Üstyapı Tasarımı

Alman otobanlarının planlanması ve inşaatı 1920’li yıllarda başlamıştır. İlk Alman otoban düşünceleri; sadece otomobil girişine izin verilen karayollarına dayanmaktadır ve 1920’li yıllarda İtalya’nın kuzeyinde Piero Puricelli tarafından inşa edilmiştir.

4.3.1.1 Önceki Otoyol Rijit Üstyapısı Tasarımı

Dört şeritli, bölünmüş bir karayolunun enkesiti ilk defa 1926 yılında ortaya konmuştur. “Otoban” kelimesinden ilk defa 1928 yılında söz edilmiştir ve tasarım hızı dağlık olmayan bölgelerde 160 km/s’tir. Bu üstyapılar bir yönde çift şeride ve 7,5 m’lik üstyapı genişliğine sahip olacak şekilde tasarlanmışlardır. 1933 yılında Alman Karayolları İdaresi, Genel Enspektörü Fritz Todt tarafından, inşaat endüstrisinin ve kontrat ile prosedürler için gerekli olan performans prensiplerine ilişkin bir şartname özeti yayımlanmıştır. *“Tercih edilen; her zaman, en düşük maliyet olmamalıdır. Kalite en önemli kriterdir.”*

Bu sırada, otoban tipindeki karayolu ağının rijit üstyapılarla inşa edilmesi kararı alınmıştır. 1940 yılına kadar yaklaşık olarak 4000 km uzunluğunda dört şeritli, bölünmüş otoban tipteki karayolları inşa edilmiştir. Savaş yılları boyunca, devlet; ordu ihtiyaçları dışında çeliğin kullanımını yasaklamıştı. Bu yasaklama nedeniyle savaş yılları sırasında rijit üstyapıların inşasına ara verilmek zorunda kalınmıştır.

1930’lu yıllarda birçok test alanının inşa edilmesiyle, bir rijit üstyapı programı tatbik edilmiştir. Bu tasarımda bazı varyasyonlar olmasına rağmen, genel tasarım şöyle ilerlemiştir:

- **Plak:**

Çoğunlukla iki tabakalı, 20-25 cm’lik uniform kalınlıklı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar inşa edilmiştir. Üst plak tabakası kalınlığı 9 cm’dir ve yüksek kaliteli agregalar (maksimum tane boyutu 3 cm) içermektedir. Alt plak tabakası kalınlığı ise 13 cm’dir ve yerel agregalar (maksimum tane boyutu 5 cm) içermektedir

- **Trafik Şeridi Genişliği:** Bir yönde iki şerit 3,75 m’dir.

- **Enine Derzler:**

Derzli-donatısız rijit üstyapılar için derz aralığı: 8-12 m

Derzli-donatılı rijit üstyapılar için derz aralığı: 12-30m (1937’de durduruldu)

Tipik genleşme derzi aralığı: 12-18 m (Not: Plaktan plağa derz aralıklarının sistematik olarak 1 m veya daha fazla arttırılıp periyodik olarak baştaki derz aralığına dönülmesi çok yaygın bir uygulamadır.)

- **Kayma Donatısı:** 35,6 cm uzunluğunda, 2,2 cm çapında çelik kayma donatıları kullanılmıştır.
- **Kayma Donatısı Aralığı:** Kayma donatıları; 30,5 cm'lik aralıklarla, plağın üst sınırına daha yakın olacak şekilde plak merkezinin yakınına yerleştirilmiştir.
- **Boyuna Derzler:** Bağ donatılarıyla bağlanmışlardır. (şerit genişliği: 3,75 m)
- **Beton:** Üstyapıların çoğunluğu; çok kuru betonun kompaksiyonunda kolaylık sağlanabilmesi ve her bir tabakada farklı kalitedeki agregaların kullanılabilmesi için, çift tabakalı olarak inşa edilirler. Üst tabaka sadece yüksek kalitedeki agregaları içermektedir. Bu agregalar basınç dayanım testi ve aşınma testi ile (genel tipler; granit, bazalt, kuvarsittir.) değerlendirilerek yabancı maddeler ve düz partiküller elenir. Biraz daha düşük kalitedeki agregalar (yerel agrega) ekonomik nedenlerle, alt tabakada kullanılır.

Agrega gradasyonu, talep edilen birkaç boyut analiziyle yakından kontrol edilmektedir. Bu şartnamenin sonucunda; şartnamelere uygun, üniform ve yoğun bir agrega gradasyonu elde edilir.

Talep edilen minimum eğilme dayanımı 3,7 Mpa ve ortalama eğilme dayanımı 4,4 Mpa'dır. Gerekli minimum basınç dayanımı 32 Mpa'dır ve ortalama basınç dayanımı 39 Mpa'dır. Dayanımlar; inşa sırasında alınan numuneler üzerinde ve yaklaşık olarak inşaattan 60 gün sonra alınan karotlar üzerinde test yapılarak ölçülür.

Genellikle; 0,45 oranında veya daha az su/çimento oranına sahip çok kuru (sıfır çökme) beton karışımları kullanılmaktadır. Hava sürükleyici karışım katkıları kullanılmaz.

• **Temel:** Donma-çözülme ve aşırı nemden kaynaklanan zarar verici etkilerin azaltılması için oldukça büyük çaba harcanmıştır. Bu durum karayoluna doğru akan yer altı suyunu veya daha düşük düzeydeki yeraltı su seviyesine doğru akan yeraltı suyunun yolunu kesip yakalayan boyuna drenlerin yerleştirilmesiyle ve plak ile temel arasına granüler tabakanın (sıklıkla kum kullanılmıştır) yerleştirilmesiyle sağlanmıştır. Sıklıkla doğal zemin üzerindeki eğim çizgisi 0,9 m veya daha fazla miktarda yükseltilir ve geçkinin yarma kesimlerinde eğim çizgisinin altına kadar kazıldıktan sonra seçilmiş olan malzeme ile yeniden doldurulur. Berlin ve çevresindeki rijit üstyapılar, sıklıkla kumdan bir temel üzerine yerleştirilmiştir.

- **Banketler:** Çoğunlukla iç banket genişliği 0,38 m ve dış banket genişliği 2,2 m'dir. Banket, renk betimlemesi için yerleştirilen 7,6 cm kalınlığında asfalt betonu kaplama ile örtülmüş 17,8 cm'lik beton tabakadan oluşur. Koyu renkli betonun kullanıldığı trafik şeritlerinde, banket çizgisinin renk betimlemesinin sağlanabilmesi için üst tabakada açık renkli beton kullanılır.

- **Yapım:** Çoğunlukla; boyuna bir derzle birbirine bağlı iki şerit aynı anda oluşturulur. Banketlerin beton temeli, üstyapı plağından önce inşa edilir ve karıştırma, yerleştirme ve bitirme işlemleriyle ilgili olan donanımları taşıyan rayların, üzerine konabileceği bir temel olarak kullanılır. Beton tokmaklanır ve vibrasyonla yerleştirilir.

Tüm yerleştirme, bitirme ve ön kür işlemleri tüm üstyapının bir tarafından öbür tarafına uzanan güneş şemsiyesi altında yapılır. Dokunmuş kür hasırları 3 hafta boyunca yerleşik biçimde bırakılır ve bu periyot boyunca sürekli olarak ıslak tutulur.

Yüzeyler, tamamen yada belirli bir dereceye kadar ortaya çıkarılmış iri agregalarla yoğun ve sıkışıktır. Kalın bir harç tabakası mevcut değildir.

Birçok kesimde orijinal Alman otobanları halen mevcuttur ve ağır trafik altında hizmet vermeye devam etmektedir. Kabarıp dökülme ve faylanma (kırıklanma) nedeniyle meydana gelen enine çatlaklar sebebiyle, bu yollardaki üstyapılar hafif derecede bozulmuştur. Herhangi bir, apaçık ortada olan pompaj gözlemlenmemiştir ve 50 yaşını geçmiş betonda bile herhangi bir durabilite problemine rastlanmamıştır. Şu anda bunların yeniden inşası için büyük çalışmalar sürmektedir ve bu üstyapılardan elde edilen beton zayıf beton temel yada üst granüler örtü tabakasında kullanılmak üzere geri kazanılmaktadır.

A10 kesiminin yeniden inşasının yapıldığı bölgede yapılan incelemede bir beton numunesi alınmış ve “Yapım Teknolojileri Laboratuvarları(Construction Technology Laboratories-CTL)” na sunularak petrografik analizi yapıldıktan sonra şu resmi sonuçlara varılmıştır:

1) Portland çimentosu bulamaçı içinde silisli ve kalkerli agregaları içeren beton örnek sağlam, yoğun ve yüksek kalitedir. Çimento şerbeti-agrega arasındaki aderans oldukça sıktır ve beton, iri agreg-a-ince agreg-a arasından kırılmaktadır.

2) Çimento şerbeti özelliklerine dayanılarak tahmin edilen su/çimento oranı 0,35'den azdır. Artık çimento partikülleri (hidratlanmamış portland çimentosu klinkeri, UPC's) oldukça bol miktardadır.

3) Betonda hava sürükleyici bulunmamıştır. Tahmin edilen hava içeriği %1-2'dir. Hava boşluklarının çoğu küçüktür ve çizgi halinde sıralanmıştır veya ikincil tortularla doldurulmuştur.

Bu üstyapıların iyi performans göstermelerine neden olan bazı sebepler şunlardır:

- Hizmet ömürlerinin ilk yıllarında daha düşük trafik yüklemeleri,
- Diğerlerine göre daha ılıman bir iklim,
- Yüksek derecede durabil beton, (Yüksek derecedeki bu durabilite; üniform gradasyonlu karışım oranı; maksimum 3 cm tane boyutlu, yüksek kaliteli, sağlam olan üst tabaka agregası; vibrasyonla konsolidasyon; düşük su/çimento oranına sahip kuru karışım; 21 günlük su kürü ve güneş ile rüzgardan korunma için kullanılan örtü; uzun yıllar boyunca buzlanmayı önleyici tuzların kullanılmaması ile sağlanmıştır.)
- Don koruması ve alt drenajın bir kısmını karşılamak için, plak ile taban zemini arasına yerleştirilen kalın granüler tabaka, (Bazen bu tabaka ince kum içermektedir ve yeterli gelmemektedir.)
- Çok yumuşak zeminin alınarak, seçilmiş malzeme ile geri dolgu işlemi
- Yeraltı suyu nem kontrolü ve
- Kayma donatılı derzler.

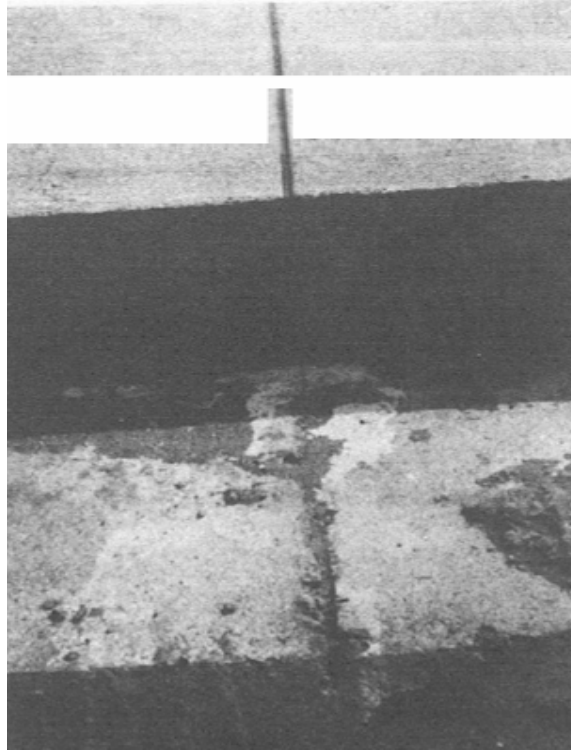
Bu tasarım için gözüken en büyük eksiklik uzun derz aralıklarıdır (özellikle çelik hasır kullanılmadıysa) ve bu kullanım; kamyon şeritlerinde kabarıp sökülmeler ile faylanmalara (kırılanmalara) sebep olan enine çatlakların meydana gelmesine neden olmuştur.

4.3.1.2 Mevcut Alman Rijit Üstyapı Tasarımı

II. Dünya savaşıdan sonra, batı ve doğu Almanya arasında rijit üstyapı tasarımı bakımından birçok farklılık bulunmaktaydı. 1970 yılından önce, Batı Almanya tasarımı; aralığı 7,5 m'den 10 m'ye kadar değişen derzli, tel kafes donatılı rijit üstyapıları ve 60 m ile 100 m aralıklı genleşme derzlerini içermektedir. Değişik bazı

- **Temel:**

15 cm'lik çimento ile işlenmiş taban zemininden veya zayıf betondan meydana gelmektedir. 3 günlük ıslak kürden sonra, basınç dayanımı 9 Mpa'ı aşar, çoğunlukla 12 Mpa'dır. Şekil 4.12'de görülebileceği gibi; plak derzlerinin tam altında, temelde yer alan derz veya çentikler aracılığıyla temel ve plak birbirine bağlıdır.



Şekil 4.12: Çentiklenmiş veya derzlendirilmiş zayıf beton temel tabakası üzerindeki beton plak. [4]

Bazen 25 cm'lik, çimento ile işlenmiş temel ile stabilize olmuş alt temel kullanılır. Bazen de 10 cm'lik bitümle işlenmiş temel kullanılır.

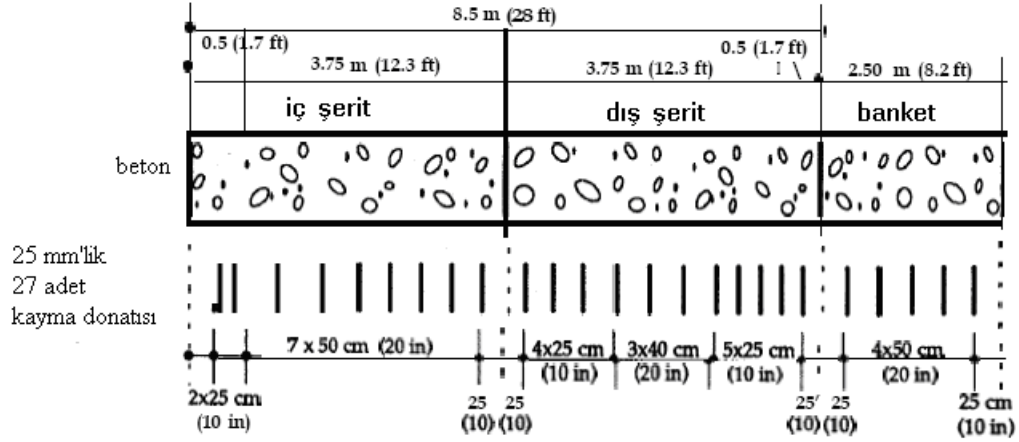
- **Alt-temel:**

Don penetrasyonuna ve taşıma gücüne göre kalınlığı 30 cm'den 90 cm'ye kadar değişmektedir. Kompaksiyondan önce 0,0063 mm'lik ince malzeme %5 ile sınırlandırılmıştır. (Kompaksiyondan sonra; ince malzeme, %7 ile sınırlandırılmıştır).

- **Enine Derz:**

5 m aralıklıdır. 2,5 cm çapındaki kayma donatıları, Şekil 4.13'de gösterildiği gibi; enkesitin bir yanından öbür yanına eşit olmayan aralıklarla yerleştirilir. Kayma

donatıları, tüm uzunlukları boyunca 0,3 mm'den daha kalın olan plastik bir tabaka ile kaplıdır ve yağlıboya kullanılmaz. Kayma donatıları otomatik olarak yerleştirilir.



Şekil 4.13: Almanya'da üstyapı enkesitinde üniform olmayan kayma donatısı yerleşimi. [9]

- **Bıçkı Derinliği:** Plak derinliğinin %25-30'u kadardır.
- **Dolgu:** Basınç dolgusu kullanılır.

- **Boyuna Derz:**

Derz kesim derinliği plak kalınlığının %40'ı ile %45'i arasındadır.

- **Bağ Donatısı:** 20 mm çapındaki çelik bağ donatıları, 0,3 mm'den kalın bir kaplama ile kaplanır.
- **Bağ Donatısı Aralıkları:** Plağın her 5 m'sinde bir derzin merkez hattında 3 çubuk, plağın her 5 m'sinde bir-şerit/banket derzinde 5 çubuk kullanılır.
- **Dolgu:** Basınç dolgusu kullanılır.

- **Alt Drenaj:**

Değişik alt drenler kullanılmaktadır. Şekil 4.14'de görülen, en son tipteki enkesitte; banketin altında boyuna alt drene doğru bir akım kanalı sağlayan poröz beton tabaka görülebilmektedir. Boyuna alt dren, düzenli aralıklarla bulunan yanal bir akım kanalına bağlıdır. Bu yanal kanal ise son olarak daha büyük çaptaki boyuna akım kanalına bağlıdır.



Şekil 4.14: Berlin'in güneyinde A10 otoyolu inşa kesiminde; plak kenarında zayıf beton temel altındaki boyuna kanala ve sol tarafta görülen rögarlara bağlı olan su toplama hazneleri. [4]

- **Banket Altındaki Poröz Beton Tabaka:**

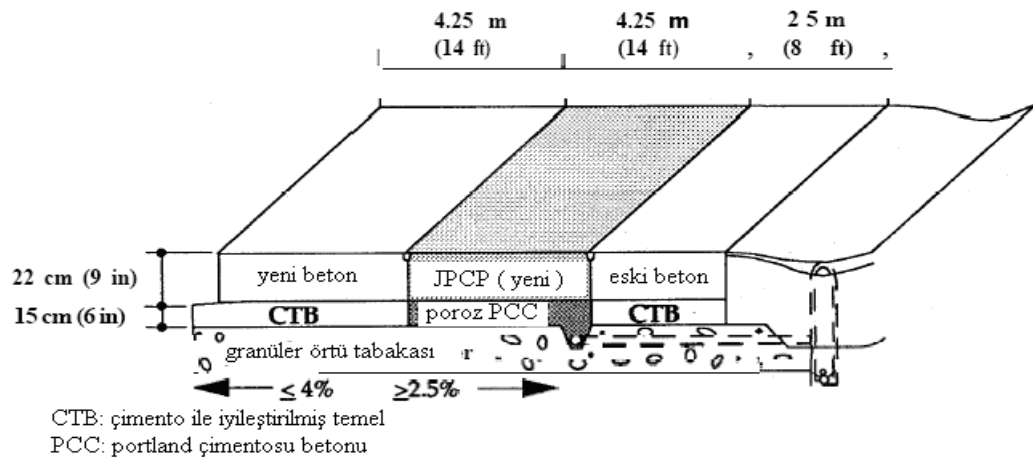
Beton banket altında yer alan 15 cm'lik poröz beton tabaka işlenmiş temel tabakasının drenajına desteklik sağlar (Şekil 4.15).

- **Yüzey:**

Makro dokulu, düşük gürültülü bir yüzey elde edilebilmesi amacıyla, yüzey ince telli bir fırçayla boyuna dokulandırılır. Dayanımı yüksek agregalar sürtünmeyi sağlar.

- **Enine Eğim:**

Trafik şeritleri %2,5'lik eğimle eğimlendirilir.



Şekil 4.15: Poröz beton temel tabakalı şeritlerin yeniden inşasında kullanılan Alman enkesiti. [9]

4.3.2 Almanya’da Mevcut Beton Gereklilikleri

- Hava boşluk sistemi gerekliliklerini içeren % 4’ten % 6’ya kadar sürüklenmiş hava
- Yoğun bir karışımın sağlanması için su/çimento oranı 0,42’den küçüktür.
- Kullanılan çimento dozajı 340 kg/m³’tür.
- Karıştırma süresi minimum 45 saniyedir.
- Gradasyonu belirli olan agregaların kullanılır.
- Agregaların donma-çözülme ve alkali-silika testlerinden geçmesi gerekir.
- Agregalar üzerindeki donma-çözülme testi etkili bir çözelti içinde 300 defa tekrarlanır ve izin verilen maksimum kayıp % 0,2’dir.
- Eğer reaktif agregalar bulunuyorsa, zayıf alkali çimento (% 0,6’dan daha az alkali içeren) kullanılır. Eğer problem sürüyorsa, agrega değiştirilir.
- Karayolu üstyapılarında uçucu kül kullanılmaz.
- Almanya, üç-noktalı yükleme testinden % 10-15 oranında daha yüksek bulunan merkez-nokta yüklemeli esnek kırış testini kullanır. Merkez-nokta yükleme testindeki minimum 5,5 MPa’lık 28 eğilme dayanımı, üç-nokta yükleme testinde 4,9 MPa’a karşılık gelir.
- Basınç dayanımı 30 cm’lik bir küp ile ölçülür. Minimum dayanım 35 MPa’dır.
- Geri kazanılmış malzeme içeren karışımlarda belirli miktarda asfalt betonunun kullanılabileceği belirtilmiştir.
- Hava boşluk içeriği ve boşluk sistem kalitesi kontrol testleri, üretimin ilk gününde uygulanır ve hava içeriği ile ilgili herhangi bir şüpheli bir durum varsa testler tekrarlanır. Kabarcık mesafesinin 0,2 mm’den az olması ve mikroporların en az % 1,8 oranında olması gerekir.

4.3.3 Çeşitli Yapım Uygulamaları

- Yeni yerleştirilmiş beton üzerine, yağmur ve güneşten korunma amacıyla serilen çadır, oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Bu prosedür aynı zamanda, plakta zarar verici bükülmelere neden olabilecek, taze betonun sıcaklığını ve termal gradiyentini azaltır.

- Kür işlemleri su serpilerek yada parafin (petrol mumu) temelli kürleme bileşenleri ile yapılır.
- Plağın iki tabakalı olarak inşaatıyla, daha düzgün profil elde edildiği gibi yüksek kaliteli agregaların maliyetli olması nedeniyle daha ekonomik karışımlar sağlanmış olur.
- Erozyona karşı direnç sağlanması için, dayanım gerekliliği minimum 9 MPa olan çimento ile işlenmiş temel tercih edilir.

Almanya, plağın bükülmesini ve erozyonu azaltmak için, zayıf beton temelin veya çimento ile işlenmiş temelin kullanılması gerektiğine inanmaktadır. Bu; beton plağın özellikle enine ve boyuna derzlerinin hemen altındaki temel kesiminin kalınlığının % 35'inin çentiklenmesiyle tamamlanır.

4.3.4 Özet

Almanya'da 1970 yılından sonra inşa edilen derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıların performansları sadece olağanüstü derecede iyi olarak tanımlanabilir. Mevcut tasarımla ilgili oldukça az problem vardır ve bu tasarım asfalt üstyapılarla ekonomik bakımdan rekabet edebilecek düzeydedir.

Bu olağanüstü iyi performansı ortaya çıkaran etkenler şunlardır:

- Değişken şekilde aralıklandırılan kayma donatılı derzler
- Erozyonun, ara yüzdeki pompajın ve bükülmelerin azaltılması için; çimento ile işlenmiş veya zayıf beton temel ile beton plak arasında sağlanan aderans.
- Erozyona karşı dirençli yüksek kalitedeki bir temel.
- Özellikle yüzeyde olmak üzere; beton içinde yer alan iyi kalitedeki agregalar
- Taban zemini üzerinde yer alan kalın granüler tabaka
- Yapım sırasında özen gösterilen hava boşluk kontrolünden dolayı, betonun donma-çözülme etkilerine karşı olan direnci
- İki-kanallı yüzey ve yüzey altı drenaj sistemi.

4.4 Hollanda

Hollanda'nın kuzey kesimlerinde ciddi oturmalar olması nedeniyle, çoğunlukla kuzey kesimlerinde olmak üzere uzun yıllardır rijit üstyapılar inşa edilmektedir. Rijit üstyapılar; vilayete ait karayolları, otoyollar ve havaalanlarında inşa edilmektedir. Bisiklet yollarının çoğunun betonla inşa edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, rijit blok kaplayıcılarının, Hollanda'daki kentsel alanlarda kapsamlı olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. [4]

Gözlemlenen en eski rijit üstyapı 1950 yılında inşa edilmiştir. Hollanda'da, liman şehirlerinden Avrupa'nın geri kalanına kargo taşıyan kamyonların kullandığı önemli karayollarının bulunması nedeniyle, bu rijit üstyapıların çoğu ağır trafiğe hizmet etmektedir.

Bu üstyapıların tamamına yakını derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar kullanılarak inşa edilmiştir. Son zamanlarda birkaç kesimdeki otoyollarda sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıların da kullanılmaktadır. Bunun yanında; Amsterdam yakınlarındaki Schipol Havaalanındaki bazı kesimlerde önerilmeli rijit üstyapılar da mevcuttur.

Şu anda Hollanda'da, rijit üstyapılarla ilgili olarak üzerinde durulan başlıca konu; tekerlek/üstyapı gürültü karakteristikleridir. Düşük gürültülü bir yüzeyle birlikte aynı zamanda yeterli sürtünme ve hizmet ömrüne sahip yüzeylerin elde edilebilmesi için, büyük saha ve laboratuvar çalışmaları sürdürülmektedir.

Hollanda beton blok kaplayıcılardan kapsamlı bir şekilde yararlanmaktadır. Her yıl yaklaşık olarak 20 milyon m²'lik beton blok kaplayıcısı yerleştirilmektedir. Beton blok kaplayıcıları ile 1950'li yıllarda tanışılmıştır ve şu anda dahili yol üstyapılarından endüstriyel yol üstyapılarına kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

4.4.1 Tasarımlar

Hollanda'da karayolları ve havaalanlarının yanında bisiklet yolları da olmak üzere birçok rijit üstyapı tasarımı gözlemlenebilmektedir.

4.4.1.1 Otoyollar ve Karayollarında Kullanılan Rijit Üstyapılar

1950'li yıllarda inşa edilmiş, ağır kamyon trafiğine hizmet veren, kumdan bir temel üzerine yapılan eski otoyollarda kullanılan; enine derzlerde kayma donatılarının

kullanılmadığı, derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılarda ciddi bozulmalar gözlemlenmiştir. Daha sonra Hollanda'daki derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılardaki enine derzlerde kayma donatıları gerekli kılınmıştır.

Hollanda'nın güneyinde, düşük bakıma ihtiyacı ve uzun hizmet ömrü nedeniyle rijit üstyapılar tercih edilmiştir ve birçok kesimde inşa edilmiştir. Bu bölgede, rijit ve esnek üstyapıların maliyeti yaklaşık olarak birbirinin aynıdır. Çift yönlü, çift şeritli, vilayete ait karayolları; her bir kenarda şerit genişletmelerine sahip (plağın her bir sınırına 20 cm'lik yol çizgisi çizilir.), kayma donatılı, 21 cm'lik derzli-donatısız tipteki plaklardan oluşmaktadır.

Hollanda 1980'li yıllardan itibaren, Alman derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımını benimsemiştir. Bu tasarım 20-22 cm kalınlıktaki plakları, derzlerde çeşitli şekillerde aralıklandırılmış kayma donatılarını, 5 m'lik derz aralığını ve 11 m 'lik tam genişlikli (3,5m genişliğinde iki şerit, 1 m'lik iç banket, 3 m'lik dış banket) üstyapıları içermektedir. Şu anda plak kalınlıkları, 26-28 cm'dir ve tekerleğin geçtiği kesimde kayma donatıları birbirine çok yakın (25cm) aralıklarla yerleştirilir.

1990 yılından itibaren düşük gürültülü ve yüksek sürtünmeli, poröz asfalt betonu yüzeyli sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıların kullanıldığı otoyollar da inşa edilmiştir. Sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılar avantajlıdır; çünkü enine derzlerden poröz asfalt betonu yüzeye doğru yansıma çatlakları görülmez. Bunun yanında; şu sıralarda hem poröz asfalt betonu yüzeyli hem de poröz beton yüzeyli sürekli-donatılı rijit üstyapılar da inşa edilmektedir.

Otoyol üstyapılarında kullanılan temel, bir kum alt-temel üzerine yerleştirilen zayıf betondan oluşmaktadır. Zayıf beton tabaka, eski betondan geri kazanılan molozlu beton içermektedir. Alman tasarımından farklı olarak, Hollanda; plak ile zayıf beton arasında aderansın sağlanmasına çalışmaz ve temeli çentmez. Bununla birlikte, plağın temelle bir şekilde 10 yıl yada daha fazla süreyle aderanslı durumda kaldığı belirtilmiştir. Yansıma çatlaklarına ilişkin bazı problemler rapor edilmiştir. Kenar hendek derinlikleri, temelden yaklaşık olarak 1 m altıdır. Sıkışmazların uzak tutulabilmesi için derzler doldurulmaktadır.

4.4.1.2 Havaalanı Öngerilmeli Rijit Üstyapıları

1967 yılında Amsterdam yakınlarında açılan, Schiphol Havaalanı, dünyadaki en büyük havaalanlarından biridir ve çok büyük miktarda ağır uçak trafiğini

taşımaktadır. Karşılaştırmalı bir çalışmadan sonra, havaalanındaki pistlerin uçlarının, bütün apron ve hangarların öngerilmeli rijit üstyapılarla inşasına karar verilmiştir. Bu üstyapılar şu anda 38 yaşındadır ve çok düşük bir bakımla mükemmel bir performans göstermektedirler.

Öngerilmeli rijit üstyapı tasarımı; 18 cm'lik öngerilmeli beton kaplamayı, 60 cm'lik çimento ile işlenmiş zemin tabakasını ve deniz seviyesinden 4 m altta olan bir kil alt temel üzerine 20 cm'lik bir kum tabakayı içermektedir. Plaklar 7,5 m eninde ve 30-120 m uzunluktadır. Yüksek dayanımlı, özgün öngerme çelik donatılarının tüpler içine yerleştirilmesinden sonra tüpler içine enjeksiyon yapılır. Bu tüpler, boyuna ve enine derzler üzerine yatırılarak ızgara formu verilir.

4.4.1.3 Rijit Bisiklet Yolları

Kısa derz aralıklı, kayma donatısız derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılardan oluşan birçok bisiklet yolu gözlemlenebilmektedir. Hollanda'da ulaşımın başlıca şekli bisikletlerdir. Bu yollar, bisikletler ve yerel zirai gereçler tarafından ortaklaşa kullanılırlar

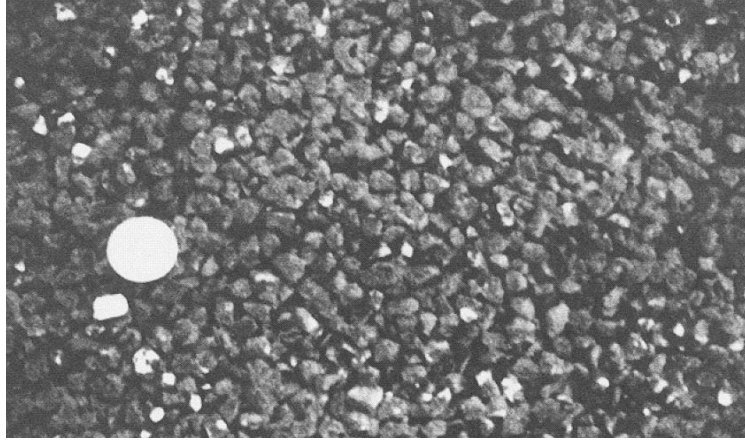
4.4.2 Gözlemlenen Proje Bölgesi (Eindhoven)

Bu kesimdeki üstyapı, gürültü düzeyini azaltma amacıyla 4 cm'lik poröz asfalt ve 3 cm'lik poröz betonla yeniden kaplanmış olan, orijinal derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıdan oluşmaktadır. Poröz asfalt veya poröz beton ile kaplama uygulamaları; yoğun asfalt betonu ile kaplamaya göre, sağanak yağış altında su sıçratma bakımından oldukça büyük avantaja sahiptir. Bunun yanında, hem poröz asfalt hem de poröz beton çok düzgün ve sessiz bir sürüş sağlar. [9]

Derzli-donatısız tipteki rijit üstyapıda bulunan, enine ve boyuna derzlerden gelen yansıma çatlakları poröz asfalt yüzeyde bekleneni yapar ve kabarıp dökülmeye başlar. Poröz beton, derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı derzlerinin üzerinden direkt olarak kesilir ve kabarıp dökülmez.

Yoğun asfalt beton yüzeyle karşılaştırıldığında, poröz asfalt yüzey; gürültü emisyon düzeyinde 3,1 dB'lik bir azalma sağlar. Poröz beton ise 2 dB'lik gürültü azalımı sağlar. Poröz betonun 3 cm yerine 4 cm'lik bir kalınlıkla inşa edilmesi durumunda daha büyük gürültü azalımı sağlayabileceği ve çeşitli inşa problemlerinin önlenebileceği ifade edilmiştir. Poröz beton veya poröz asfalta ilişkin başlıca

problem; gevşek malzeme ile dolabilmesi ve bu yüzden ses-absorbsiyon karakteristiklerinin yıllar geçtikçe azalabilmesidir.



Şekil 4.16: Hollanda’da derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı üzerine yerleştirilen poröz beton yüzey. [9]

4.4.3 Özet

Şu anda, Hollanda’da; daha önceki yıllara göre, rijit üstyapılar daha çok tercih edilmektedir. 1950’li yıllarda ortaya çıkan ana problem, kayma donatısı kullanılmaması sebebiyle derz faylanmasıdır (kırılma). Alman kayma donatılı, derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımının benimsenmesiyle bu problem ortadan kalkmış ve düşük bakımla uzun süreli performans sağlanabilmiştir. Hollanda’da yeni fikirlerin denenebilmesi için büyük bir istek bulunmaktadır.

Rijit üstyapılarla ilgili olarak üzerinde durulan başlıca konu; tekerlek/üstyapı gürültüsünün azaltılabilmesidir. Kayda değer araştırmalar sürdürülmektedir ve birkaç teknik, değerlendirme altındadır. Poröz beton veya poröz asfalt yüzeyle gürültü seviyesinin azaltılabileceği belirtilmiştir. Deneyimler göstermiştir ki poröz beton yüzey ile gerekli gürültü absorbsiyonunun, durabilitenin ve dayanımın elde edilebilmesi mümkündür.

4.5 Belçika

Belçika uzun yıllardır rijit üstyapılar inşa etmektedir. Şekil 4.17’de görülebileceği gibi, 1925 yılında Brussels’in güneyinde inşa edilen derzli rijit üstyapı hala iyi durumdadır. Otoyolların yaklaşık olarak %40’ı rijit üstyapılar kullanılarak inşa edilmiştir. Bu rijit üstyapıların çoğunluğu sürekli-donatılı tipte olmakla birlikte, aynı

zamanda birçok derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar da mevcuttur. Örneğin; 1957 yılında Eindhoven ile Brussels arasında inşa edilen kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı bugün hala iyi durumdadır. Rijit üstyapı; 15 cm'lik işlenmemiş kum tabaka ve 15 cm'lik çimento ile işlenmiş kum tabaka üzerine 20 cm'lik beton bir plakla meydana getirilir. Belçika devleti, düşük bakım ihtiyacı nedeniyle sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıları tercih etmiştir. Bu tipteki üstyapılar, 1970 yılından beri eski rijit veya asfalt üstyapı kaplaması olarak ve yeni üstyapıların yapımında kapsamlı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.17: Dreve-de-Lorraine Karayolu, Brussels; 1925 yılında boyuna derz olmadan inşa edilmiş olan derzli rijit üstyapı. [4]

Belçika, 1980'li yıllarda geliştirdiği ve kapsamlı olarak kullandığı, yuvarlanma gürültüsü ve vibrasyon düzeyini azaltıp, bununla birlikte yüksek sürtünmeli bir yüzey sağlayan; ortaya çıkarılmış agrega tekniğiyle çok iyi bilinmektedir.

4.5.1 Tasarımlar

Hem kayma donatılı derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılar hem de sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılar inşa edilmektedir. Önceki ve mevcut sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı şöyle özetlenebilir:

Tablo 4.3: Belçika’da, önceki ve mevcut, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı [9]

İnşaat Kalemi	Önceki Tasarım (1970-1978)	Mevcut Tasarım
Sürekli-Donatılı Plak	20 cm (Yüksek Dayanım)	Aynı
Donatı	% 0,85	% 0,67
Donatı Derinliği	6 cm	9 cm
Asfalt Beton Ara Tabaka	6 cm	***
Zayıf Beton Temel	20 cm	Aynı
Granüler Radye	20 cm (Minimum)	Aynı
Boyuna Derz Derinliği	< 0,3xPlak	0,33xPlak

*** Bu tabaka birkaç yıl boyunca kaldırılmış fakat şu an tasarıma tekrar dahil edilmiştir.

Önceki sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı ile, ağır kamyon trafiği taşıyan, 100 km’nin üzerinde otoyol inşa edilmiştir. Bunlar olağanüstü performans göstermişlerdir; üzerinden 30 yıl geçmesine rağmen herhangi bir zımbalama etkisi (punchout) görülmemiştir. Şekil 4.18’de 30 yıl önce inşa edilen bu üstyapılardan bir tanesi gösterilmektedir.



Şekil 4.18: Belçika’da; donatı içeriği % 0.85 olan, asfalt betonu ara tabakalı, zayıf beton temel ve granüler alt temele sahip, 30 yaşını geçmiş olan sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı. [4]

Buna karşın, 1978 yılı sıralarında, üstyapılarda çok yakın aralıklı dar çatlaklar (çatlak aralığı 0,5 m olarak gözlemlenmiştir) gözlemlenmiştir ve devlet, üstyapının dağılacağına dair endişeye düşmüştür. Daha sonraki projelerde donatı oranı

%0,67'ye düşürülmüştür ve asfalt betonu ara tabaka kaldırılmıştır. Daha yeni olan bu üstyapıların bazılarında kabarma çatlakları ve zımbalama etkisi (punchoutlar) gözlemlenmeye başlanmıştır. Tipik çatlak aralıkları şöyledir:

Tablo 4.4: Önceki ve mevcut tasarımlar sonucunda gözlemlenen çatlak aralıkları. [4]

İnşa Mevsimi	Donatı Yüzdesi	Ortalama Çatlak Aralığı
Yaz	0,85 (önceki)	0,40
	0,67 (sonraki w/o AC)	1,00
Kış	0,85 (önceki)	0,75
	0,67 (sonraki w/o AC)	1,60

%0,85 donatılı içeriğine sahip, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıda görülen bu yakın çatlak aralıkları, 6 cm'lik asfalt betonu ara tabakanın sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı ile sıkı bir şekilde aderanslı olarak bulunduğu önceki tasarımda da görülmüştür. Belçikalılar, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı ile asfalt betonu ara tabaka arasındaki aderansın, 2 cm'lik betona eşdeğer bir yapı sağladığına inanmaktadırlar.

Bununla beraber, yapım ile ilgili bazı problemlerden dolayı, 6 cm olan donatı derinliği 9 cm ile değiştirilmiştir. Güneşli bir günde, boyuna donatı yakınındaki vibrasyon etkisinden dolayı, donatı şablonu gözle ayırt edilebilmektedir; donatı çubuklarının altında kalan beton daha çok titreşir ve bu da yüzey düzgünlüğünde kayba yol açar. Buna karşın, Belçika donatısını yarı-derinliğin üzerinde yerleştirilmesinin çatlakları dar tuttuğuna inanmaktadır.

1978 yılından itibaren asfalt ara tabakanın olmadığı, donatı oranının % 0,67–derinliğinin 9 cm olduğu, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı kullanılarak inşa edilen birkaç kesimde daha büyük çatlak aralıkları, daha geniş çatlaklar, zayıf beton temelin erozyonu ve bazı zımbalama etkileri (punchoutlar) görülmüştür.

Banketlere, asfalt bir yüzeyle beraber granüler bir temel dahil edildiğinde, su yanal olarak drene edilebilir. Buna karşın; banket tüm derinlikte asfalt betonuyla inşa edilirse, bir su havuzcuğu oluşur ve buna bağlı olarak zımbalama etkisini (punchoutları) takip eden kayda değer erozyon oluşumları gözlenir.

Son zamanlarda, sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapıların çatlak görülen kesimlerinden alınan karotlar üzerinde yapılan testlerle, korozyon ile ilgili birtakım araştırmalar yapılmıştır. Özellikle önceki (% 0,85 donatılı) kesimlerde, asgari korozyon gözlemlenmiştir. Önceki tasarımla ve mevcut tasarımla inşa edilmiş

üstyapıların; ciddi çatlakların olduğu kesimlerinde yapılan ölçümlere göre, donatı çubuklarının enkesit alanındaki kayıp % 5'i geçmemektedir.

4.5.2 Gözlemlenen Proje Bölgesi

Belçika'da çoğunlukla kullanılan sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapılara ait üç kesim gözlemlenmiştir:

4.5.2.1 Bierbeck Yakınlarındaki E40 Çevre Otoyolu

Sürekli-donatılı tipteki bu rijit üstyapı, zımbalama etkisi (punchout) olmadan ve birbirine yakın olmayan çatlak aralıklarıyla mükemmel bir yapısal durumdadır ve %20'si ağır kamyon olan 63000 ADT'yi taşımaktadır. Ölçülen yuvarlanma gürültüsü düzeyi dB biriminde aşağıda gösterilmektedir. Elmas öğütücü ile uygulanan işlemden sonra gürültü düzeyinin ortalama 4 dB azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.5: Elmas öğütücü ile uygulanan işlemden önce ve sonra ölçülen gürültü düzeyleri. [4]

Şerit	Öğütmeden Önce	Öğütmeden Sonra
1	87,9-90,3	83,4-86,8
2	90,2-91,3	86,2-87,5

30 yaşındaki, sürekli-donatılı tipteki bu rijit üstyapıda, oldukça kaba taneli enine dokudan kaynaklanan gürültüye bir çözüm olarak elmas öğütücü ile boyuna doğrultuda işlem yapılmıştır ve öğütme işleminden sonra hala enine dişler mevcuttur.

Öğütülmüş yüzeydeki titreşim düzeyi, daha önceki enine-dişli yüzeye göre oldukça düşüktür. Ayrıca öğütmeden sonra sürtünme düzeyinde kayda değer derecede artışlar elde edilmiştir.

4.5.2.2 E40 Bertem Yol Genişletme İnşası Kesimi

21 yaşındaki, 20 cm'lik, % 0.85 donatı içerikli sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı ek bir sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı şeridiyle genişletilmiştir.

- Düşük gürültülü yüzey dokusu; kimyasal olarak ortaya çıkarılan agregalarla sağlanmıştır. Plak tüm derinliği boyunca, tek tip agregayla (maksimum boyut 2 cm) tek bir tabaka halinde yerleştirilmiştir. Kaplayıcı geçtikten hemen sonra, harç içine birkaç mm penetre olan bir geciktirici yüzeye spreylenecektir. Daha sonra Şekil 4.19 'da görüldüğü gibi polietilen bir tabaka ile yüzeyi örtülmüştür. Bu örtü geciktiricinin sert hava koşullarından

korunmasına ve geciktirilmiş yüzey harcının 24 ile 72 saat sonra özel tel fırçayla alınması sırasında kürlenmesine yarar.



Şekil 4.19: Geciktirici spreylendikten sonra beton yüzeyin üzerine yerleştirilen polietilen örtü (Robuco süreci). [4]

Yüzey agregaları, arzu edilen dokunun elde edilebilmesi için, Şekil 4.20’de görülen döner fırça kullanılarak ortaya çıkarılır. Bu yüzeylendirme işlemi sırasında 2 mm’lik doku sağlayan şeker-bazlı bir geciktirici (E40 projesinde kullanılmıştır) ya da daha ince olan 1 mm’lik doku sağlayan kimyasal bir geciktirici (Avusturya’da olduğu gibi) kullanılır.



Şekil 4.20: Polietilen örtü kaldırıldıktan sonra yüzeydeki harcı alarak agregalarının ortaya çıkarılmasını sağlayan döner fırça. [4]

- Enine elik donatı, enine çatlak oluşma potansiyelinin önüne geçilmesi amacıyla eğilmiştir.

4.5.2.3 E40 Otoyolu; Sürekli-Donatılı Tipte Rijit styapı

Bu yöndeki trafik, Bierbek'teki E40 projesine benzer şekilde çok ağırdır. Bu styapı 30 yaşındadır. 6 cm derinlikteki-% 0.85 oranındaki donatıya, 20 cm sürekli-donatılı tipteki rijit plağa, 6 cm'lik asfalt betonu ara tabakaya, 20 cm 'lik zayıf beton temele ve 30 cm'lik granüler alt temele sahiptir. Çatlaklar 0.5 m aralıklıdır ve çok dar olmakla beraber, herhangi bir kırılma gözlemlenmemiştir. Bu proje mkemmел hizmet veren Belçika tasarımına iyi bir örnektir.

4.5.3 zet

Belçika'daki rijit styapıların, özellikle sürekli-donatılı tipteki rijit styapıların, performansı sadece olağanüstü iyi olarak tanımlanabilir. nceki tasarımıla elde edilen mkemmел performansa etki eden başlıca unsurlar:

- Sürekli-donatılı tipteki rijit plağın üstünden 6 cm derinliğe yerleştirilen % 0.85 oranındaki donatı,
- Aşınmaya karşı direnç amacıyla kullanılan yüksek imento içeriği,
- Erozyonun azaltılması için, sürekli-donatılı tipteki rijit plakla zayıf beton tabaka arasında aderans sağlayan 6 cm'lik asfalt betonu ara tabaka,
- Taban zemininin üzerindeki kalın granüler tabaka,
- Yüksek dayanımlı beton ve bunun donma-zlmeye karşı yüksek direnci.

Dar atlak aralıkları ve erozyonun olmaması nedeniyle düşük bakıma ihtiyaç duyan, 30 yıl veya daha uzun süreli bir hizmet ömrü beklenmektedir.

Son zamanlarda, donatı içeriğinin % 0.67'ye indirilmesini, donatının 9 cm derinliğe yerleştirilmesini ve asfalt betonu ara tabakanın elimine edilmesini içeren tasarımlar ortaya konmuştur. Bu styapı tasarımı daha önceki sürekli-donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı gibi iyi bir performans göstermemiştir; çatlaklar daha geniştir ve plak ile zayıf beton tabaka arasında erozyon oluşumu gözlemlenmiştir. şu anda asfalt betonu ara tabakanın yeniden kullanılmaya başlandığı rapor edilmiştir.

4.6 Amerika Birleşik Devletleri

Rijit üstyapılar ABD'deki yüksek sınıftaki millerce yolun yalnızca %15'ini (219.487 km) oluşturur. Ancak, rijit üstyapılar yol ağının en yüksek hacimli, yüksek hız ve ağır taşıt trafiğinin taşındığı kısmı olan eyalet içi sistem nedeni ile ulusal yol şebekesinde, %50'nin üzerinde bir değerle, hayati bir rol oynar. Rijit üstyapılar ayrıca kent kesimi ve havaalanlarında çokça kullanılır.

4.6.1 Rijit Üstyapı Tiplerinin Tanımı ve Kullanımı

ABD'deki yüksek hacimli yollar ve caddeler, iki tip üstyapıdan birine sahiptir. 'Esnek' terimi asfalt betonu ile kaplanan yolları belirtir. ABD'deki genellikle bilinen üç tip rijit üstyapı kullanılmaktadır. Bunlar derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardır.

4.6.1.1 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı 3 ile 6 m uzunluğundaki kısa plaklardan oluşur. Plaklar 127 ile 356 mm kalınlığında olup donatı içermezler. Derzler geçmeli veya geçmesiz olabilirler. Plaklar genel olarak granüler malzeme, çimento veya asfalt stabilizeli tabakalar üzerine inşa edilir.

Zayıf beton ve sıkıştırılmış kaba agregadan inşa edilen temeller, halen bazı eyaletlerde kullanılmaktadır. Temel tabakası kalınlıkları 102 ile 204 mm olabilir.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar kullanılan kısa derz boşluğu, plak ortası çatlamayı asgariye indirmek ve derz açıklıklarını nispeten küçük tutmak için kullanılır. Derzlerde yükün transfer edilmesinde, malzeme aderansından yararlanılır. Ağır trafik taşıyan yollarda, özellikle nemli bölgelerde (başlıca ülkenin doğu yarısında), yük transferini geliştirmek için donatı veya, daha ziyade, stabilize temel tabakaları kullanılır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar genellikle, ABD'deki tüm iklim alanlarında, havaalanlarında, otobanlarda ve şehir içi caddelerde kullanılır. Bu tip rijit üstyapılar, birçok eyalette tercih edilmektedir.

4.6.1.2 Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar

Derzli donatılı tipteki rijit üstyapı inşasında kullanılan döşeme, uzunlukları 8 ile 30m olan plaklardan oluşur. Plak kalınlıkları 152 ile 356 mm olup, ortalarından donatı geçmektedir. Temel tabakası kalınlıkları 102 ile 204 mm'dir.

Daha uzun derz boşluğu verildiğinde, trafik yüklerine, kurumadan dolayı büzölmeye ve ısıdan dolayı kıvrılmaya bağılı olarak derzli donatılı tipteki rijit üstyapılarda çapraz çatlaklar oluşur. Donatı kullanılmasıındaki amaç bu plak ortası çatlaklarını sıkıca kapalı tutmaktır. Çatlakları sıkı tutarak, yük transferinin harç kenetlenmesi yoluyla sürdürölmesi, donatı tarafından yapılır; burada donatı, beton plağıın esneklik kapasitesini arttırmak için kullanılmaktadır.

Daha uzun derz boşluğu kullanılması ayrıca daha büyük derz açıklıklarına neden olur. Dolayısı ile derzler arası yük transferini sağlamak için donatı kullanılır. Derzli donatılı tipteki üstyapılar, donma ısısındaki (kuzey) bölgelerde ve nemli (doğıu) bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

4.6.1.3 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı döşemeleri, çapraz derzler olmaksızın döşenen rijit bir plaktan oluşur. Donatı plak boyunca sürekli olarak vardır ve derzler yalnızca her gün – iş bitiminde konulur. Plak kalınlıkları 152 ile 254 mm olur. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda derzli donatılı tipteki rijit üstyapıdan oldukça fazla donatı vardır : Tipik olarak plak kesit alanının %5 ile %7'si.

Uzun derz boşluklarının bir sonucu olarak sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda üstyapı ömrünün ilk birkaç yılı boyunca 0.6 ile 2.4 m'lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar plak içindeki donatı sağlam olduğı sürece sıkıca kapalı kalırlar. Eğer donatı yüksek çekme gerilmeleri sonucu kırılırsa, enine çatlaklar açılarak bozulabilir. Uzunlamasına çatlaklarla birleşen bozulmuş enine çatlak bölgeleri, ciddi üstyapı bozulmasını işaret eden yüzeysel oyulmalara yol açabilir. Plak desteğini arttırmak ve tekerlek yükleri altındaki plak gerilmelerini azaltmak için, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı ile birlikte genellikle bir stabilize temel kullanılır.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar Illinois, Virginia, Mississippi, Texas ve Oregon dahil bazı eyaletlerde şehirlerarası yol yapımında yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, ABD'deki toplam rijit üstyapı milajının oldukça küçük bir yüzdesini kapsamaktadır.

4.6.2 Genel Performans

Tüm bu rijit üstyapı tipleri, ağır trafik yükleri altında uzun ömür sağlamak içindir. Örneğın Illionis'teki derzli donatılı tipteki rijit üstyapı, ağır trafik ve sert iklim

şartları altında ortalama 28 yıl ömürle eyalet içi sistem içerisinde hizmet etmiştir. Daha yumuşak bir iklimi olan California’da derzli donatısız tipteki rijit üstyapı daha da uzun hizmet etmiştir. Ancak her tipte, hizmet ömürlerini kısaltan özgün tasarım bozuklukları ortaya çıkmıştır. Genelde derzli donatısız tipteki rijit üstyapı mükemmel hizmet görmüş olup, birkaç tasarım iyileştirmesi ile sermaye yatırımı için en iyi performansı vaat etmektedir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı için bazı ek performans detayları ve tasarım tavsiyeleri verilmiştir.

4.6.3 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapının Performansı

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıda iki ana bozulma nedeni; plak çatlaması ve destek kaybıdır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar derz boşluğu, çatlamayı asgaride tutmak için özellikle kısa tutulmaktadır. Kural olarak, derz boşluğu (fit olarak), plak kalınlığının (inch olarak) 1.75 katını geçmemelidir. Örneğin, plak kalınlığı 10 inch (254 mm) ise, derz boşluğu 17.5 fit (5.3 m)’ye eşit veya daha az olmalıdır.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıda çatlama aşağıdaki nedenlerle olabilir:

- Termal gerilmeler; betonda, gün boyu değişen, ısı düzeylerine bağlı olarak
- Trafik yükleri; plak üzerinde tekrarlanan gerilme oluştururlar.

Rijit plağı bozarak ve plağın üst ve alt yüzeylerinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşturarak nem aşındırması ve termal gerilmeler trafik yükleri altından plak üzerinde oluşan gerilmelerin miktarını etkilerler. Örneğin düşük gece ısısı plağın üst yüzeyinin gerilmesi ile plak kenarlarının temelden yukarı kıvrılmasına neden olur. Plak ağırlığının bu yukarı karşı koyulması ile plak üstünde çekme gerilmesi, plak altında ise basınç gerilmesi oluşur. Trafik yükleri de derzler arasındaki noktada plak altında ve kenarlar civarında plak üstünde gerilme oluştururlar. Termal gerilme ve trafik yükü gerilmeleri böylece, plağın temel üzerinde düz kalmasına nazaran daha düşük serbest kenar ve daha yüksek köşe gerilmeleri oluşturmak üzere birleşirler. Gündüzleri plak, plak üstünün genleşmesi ile ters yönde kıvrılır ve etkiler tersine döner.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıda ikinci ana bozulma nedeni, ‘boşluk gelişmesi’ veya ‘erozyon’ denilen, destek kaybıdır. Destek kaybının başlaması için iki koşul gerekir: (1) Plak altında, derz ve çatlakları boşaltmaya yarayan su drenajının

yetersizliği ve (2) Derz ve çatlak açılmasına bağlı olarak, derzler ve çatlaklar boyunca harç aderansı ile sağlanan yük transferinin kaybı. Bir tekerlek yüksek hızda bir derz veya atlağa yaklaştığında, yük transferinin kaybı plağın aŗađıya eğilerek plak altındaki biriken suyun ileri itilmesine neden olur. Tekerlek derzin veya çatlağın diğer yanına geçtiğinde, plağın diğer ucunu aŗađıya eğerek suyun geriye, derz veya çatlaktan yukarıya gitmesine neden olur.

Bu dinamik ‘pompalama’, derzler ve çatlaklar civarında plağın alt düzeyini ve temelini aŗındırır. Zamanla bu aŗınma nedeni ile, plak altında boŗluklar oluŗur. Boŗluklar tekerlek yükleri altında gerilmenin ve bükülmenin artmasına ve sonuçta köşelerin kırılmasına yol açar.

4.6.4 Derzli Donatısız Tipteki Rijit styapılar İçin İyileştirilmiŗ Tasarım ve İnŗa Metotları

Aŗađıdaki faktörlerin derzli donatısız tipteki rijit styapıların ömrünü uzattığı grlmŗtir:

- Stabilize temel,
- Plak kalınlığında artıŗ,
- Portland imento betonundan banket,
- Taban zemini reaksiyonun (k-değer) lsnde artıŗ,
- Beton dayanımında artıŗ,
- Düzgün kesilmiŗ ve doldurulmuŗ enine derzler,
- Kayma donatılarının kullanımı (apla birlikte yararı artmaktadır),
- Sağlam, dayanıklı agrega kullanımı.

4.6.5 zet

Rijit styapılar ABD’de mükemmel performans gstermiŗlerdir. Bir çoğu tasarım trafiklerinden çok daha fazla yklenmiŗler, ancak 20 yıldan fazla hizmet vermiŗlerdir. Bu styapılara etkili yenilemeler yapılmıŗ ve hizmet ömürleri 10 yıl veya daha fazla uzatılmıŗtır. Gemiŗ deneyimlere dayanarak, az miktarda tasarım deđiŗiklikleri yapıldığında, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar (ve derzli donatılı

tipteki rijit üstyapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar)'ın ömürleri daha da uzatılabilir.

4.7 Türkiye

KGM 1950 yılında kurulmuştur. Kuruluşundan günümüze dek yeni karayolları ve otopanlar inşa ederek, mevcut yolların bakım ve onarım işlerini kusursuz bir şekilde yaparak hizmet vermektedir. Ancak, nedense 63.000 km. şehirlerarası yolun tamamı asfaltdır. Bu süre içerisinde elle yapılan birkaç beton yol da zayıf dizayn ve işçilikten dolayı fazla hizmet verememiştir. Günümüzde Türkiye karayolu taşımacılığına ağırlık verdiği için mevcut yollardaki trafik yükü düzenli olarak artmaktadır. Türkiye Avrupa'nın en büyük TIR filosuna sahiptir. Sonuç olarak asfalt yollarda, ciddi trafik sıkışıklıklarına sebep olan bakım ve onarım işleri daha çok ve sık gerekmektedir.

4.7.1 Adana'da İlk Rijit Üstyapı Uygulamaları

1985-1990 'lı yıllarda Adana Büyükşehir Belediyesi tarafından başlatılan Yeni Adana Projesi kapsamındaki Planlı Şehirleşme uygulamalarında bir çok bulvar Beton Yol olarak yapılmıştır. Günümüze kadar herhangi bir bakım ve onarım gerektirmeden hizmet veren bu yolların daha da uzun yıllar hizmet vereceği görülmektedir. Başta Adana Büyükşehir Belediyesi olmak üzere diğer çevre Belediyeler de beton yolların yapımı konusunda yeni projeler üretmeyi planlamaktadırlar. Adana Büyükşehir Belediyesi 'nin 1985-1990'lı yıllarda yapımını gerçekleştirdiği Beton Yollar 'ın mevcut görüntüleri aşağıda verilmiştir. [17]



Şekil 4.21: Adana-Mavi Bulvar (Yapım yılı: 1986, 2x2 şerit) [17]



Şekil 4.22: Adana-Turgut Özal Bulvarı (Yapım yılı: 1986-1987, 2x3 şerit) [17]



Şekil 4.23: Adana-Adnan Menderes Bulvarı (Yapım yılı: 1987, 2x2 şerit) [17]



Şekil 4.24: Adana- Özdemir Sabancı Bulvarı (Yapım yılı: 1994, 2x2 şerit) [17]



Şekil 4.25: Adana- İncirlik Hava Üssü çevre güvenlik yolu beton dökümü [17]

4.7.2 Afyonkarahisar'daki Rijit Üstyapı Uygulamaları

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) ülkemizde beton yolu tanıtmak ve beton yol uygulamalarını başlatmak amacı ile çeşitli etkinliklerde bulunmuştur. Bunların arasında konu ile ilgili yayınlar çıkarmak, ulusal ve uluslararası sempozyumlar düzenlemek sayılabilir. Bu konudaki en önemli gelişme ise kuşkusuz 9 Nisan 2002 tarihinde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ile imzalanan protokol olmuştur. [21]

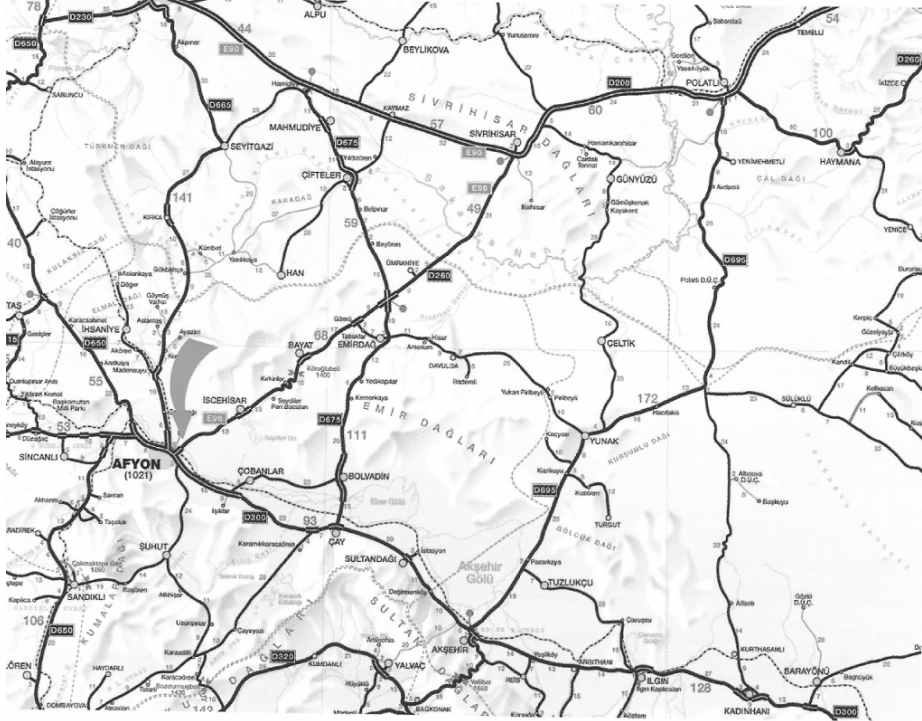
Protokol'e göre TÇMB deneme amaçlı olarak iki ayrı güzergahta beton yol yapımını üstlenmiştir. İstanbul'daki beton yol Hasdal Kavşağı- Kemerburgaz yolunun 3.5 km lik bir bölümünde, Afyon'daki beton yol ise Afyon-Emirdağ yolunun 2 km'lik bir bölümünde yapılacaktır. Her iki yolda temel tabakalarının yapımı KGM, beton plakların yapımı da TÇMB tarafından gerçekleştirilmiştir.

TÇMB rijit üstyapı projelendirme metodu ile rijit kaplama yapımı teknik şartnamesinin hazırlanmasında KGM'ne yardımcı olacak, beton yol konusunda KGM teknik personeline kurs / seminer verilmesini ve yurt dışında inceleme yaptırılmasını sağlayacaktır. Afyon'daki yolun bakım ve onarımı yapımından sonra 5 yıl süre ile TÇMB'ye ait olacaktır.

- **Afyon Yolu İçin Yer Seçimi**

Protokol'da Afyon'da yapılacak yolun Afyon Emirdağ Ayrımı-4.Bölge Hududu Devlet Yolu üzerinde İscehisar geçişinde yapılması öngörülmüştür. Bu yol KGM tarafından iyileştirilerek bölünmüş hale getirilmekteydi. O tarihte İscehisar geçişi zaten bölünmüş olduğundan bir yönü beton kaplama yapılırken mukayese amacı ile

diğer yönünün de asfalt betonu ile yapılabileceği düşünülmüştür. Ancak, aradan geçen sürede yolun Afyon çıkışında da bölünmüş yol çalışmaları başlayarak hızla ilerlemiştir. Bu durumda beton yolun Afyon merkezinden 19km uzaktaki İscehisar yerine şehre daha yakın bir yerde yapılabilmesi hususu araştırılmıştır. KGM'nin de onayı ile beton yolun 5+700 ile 7+700 km arasında bölünmüş kesimin Afyon'a gidiş yönünde yapılmasına karar verilmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26: Afyonkarahisar'da yapılan rijit üstyapının yeri [21]

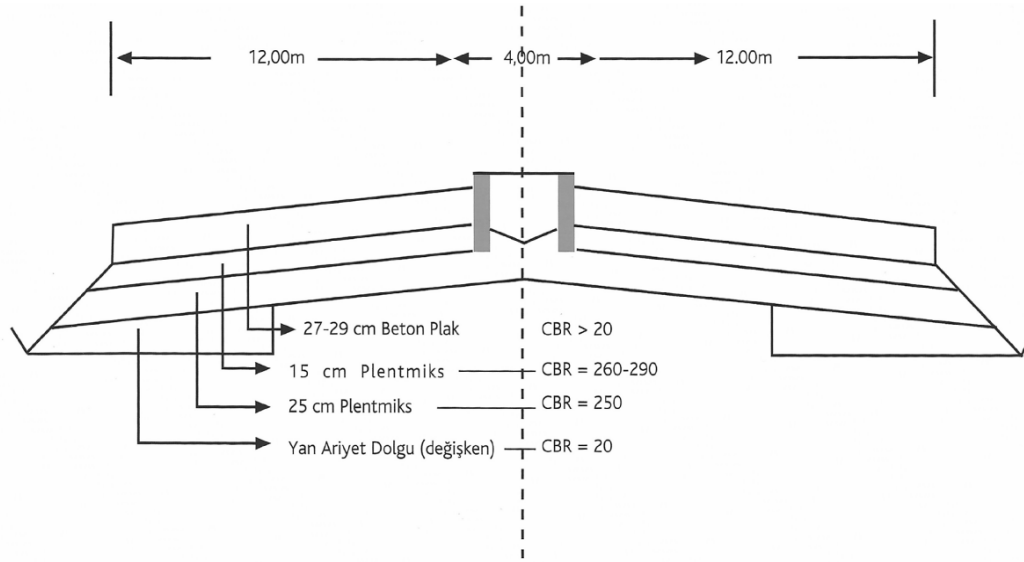
- **Mevcut Yolun Özellikleri ve Yöredeki İklim Koşulları**

Genişletilerek bölünmüş hale getirilen Afyon-Emirdağ Ayrımı yolunun tipik bir en kesiti ve KGM tarafından hazırlanan alt yapısı Şekil 4.27' de gösterilmiştir. Platform genişliği 3 trafik şeridi için 12 m olup enine %2 lik bir eğim öngörülmüştür. Plentmiks (granülemetrisi ayarlanmış agrega) alttemel ve temel tabakaları sırası ile 25 ve 15 cm kalınlıkta olup kaplama tabakaları için kırmızı kota (yol üst seviyesine) kadar 30 cm kadar bir kalınlık kalmaktadır.

Güzergaha ait zemin ve toprak deney sonuçları KGM 3. Bölge Müdürlüğü tarafından sağlanmıştır. Tabakaların ortalama CBR (California Bearing Ratio) değerleri şekilde

gösterilmiştir. Beton yol yapımına başlandığında yolun bir bölümü üzerinde yaklaşık 15 cm kalınlığında sathi asfalt kaplama bulunuyordu.

KGM'den alınan bilgilere göre 2003 yılı itibarı ile Afyon-Bayat arası günlük ortalama trafik 2061 otomobil, 550 otobüs, 1323 kamyon ve 12 tır olarak belirlenmiştir. Kamyonların büyük bölümü ham veya işlenmiş mermer taşımaktadırlar.



Şekil 4.27: Afyonkarahisar-Emirdağ Ayrımı Yolu tipik en kesiti [21]

Deniz seviyesinden 1015 m yükseklikte olan Afyon'da kara iklimi hüküm sürmektedir. En sıcak ay ortalaması 22.1 °C, en soğuk ay ortalaması ise 0.3 °C olup, en yüksek 37.8 °C ve en düşük -27.2 °C gibi sıcaklıklar elde edilmiştir. Kışları kar yağışlı geçmekte, yollar üzerinde donma-çözülme olayı meydana gelmektedir.

Hava alanı inşaatlarında, buralardaki beton pist ve apronların gerek projelendirilmesinde ve gerekse yapımında deneyim kazanmış müteahhitlerimiz vardır. Ancak beton yol projelendirilmesi ve yapımı biraz farklılıklar gösterir. Beton yol konusunda ülkemizde şimdiye kadar ciddi bir uygulama ve deneyim birikimi bulunmadığı için Afyon'da yapılacak yol ile ilgili proje ve teknik şartnamenin Belçika Çimento Birliği (FEBELCEM) tarafından tavsiye edilen uzmanlara hazırlattırılması uygun görülmüştür. Bilindiği gibi Belçika beton yol yapımının yaygın olduğu ülkelerden biridir.

Yol ve yöre ile ilgili olarak önceki bölümde açıklanan bilgiler uzmanlara verilmiş, kendileri ayrıca Afyon’u ziyaret ederek yol mahallini incelemişlerdir. Hazırlamış oldukları proje ve şartname aşağıda özetlenmiştir.

- **Proje ve Beton Plak Kalınlığı**

Teorik olarak beton kaplama hesapları çok karmaşıktır. Beton yol yapımında deneyimli ülkeler teorik tasarım yöntemlerini uygulamadan gelen bilgileri kullanıp grafikler ve tablolar oluşturarak tasarımcı için basitleştirmeye çalışmışlardır, Amerikan tasarım metodu (AASHTO) dan biraz farklı olarak Belçika ve diğer bazı Avrupa ülkelerinde beton yol tasarımı son derece pratik hale getirilmiştir. “Katalog” olarak adlandırılan tasarım el kitaplarında beton plak kalınlığını, temel ve alttemel tabaka cinslerini ve kalınlıklarını, CBR değerlerini gösteren tipik kesitler sıralanmıştır. Uygulanacak beton kaplama tipi (derzli, sürekli donatılı,...), hizmet ömrü, beklenen trafik (standart dingil) yük sınıfı, zemin özellikleri ve iklim koşulları gibi parametreleri belirterek projeye uygun kesit seçilebilmektedir.

Kendilerine verilen bilgiler ve Şekil 4.27’ deki tabaka kalınlıkları ışığında Belçikalı uzmanlar trafik yükünün ilerde artacağını düşünerek Belçika Şartnamesindeki B2 sınıfına benzer bir üst yapı ve derzli kaplama tipi önermişlerdir. Buna göre temel tabakası üzerinde 6 cm kalınlığında bir asfalt tabakası ve onun üstünde 23cm kalınlığında beton plak bulunacaktır. Daha sonra asfalt tabakasından vazgeçilmiş ve beton plak kalınlığı 27cm olarak belirlenmiştir.

- **Rijit Üstyapı Uygulamasında Başlıca İşlemler**

Beton yol yapımında yer alan başlıca işlemler aşağıda sıralanmıştır:

- Beton plak dökülmeden önce temel tabakası yüzeyinin kir ve tozdan arındırılması, su birikintilerinin giderilmesi,
- Beton plağın 12 m genişliğinde ve 27 cm kalınlığında olarak %2 enine eğimle serilmesi ve mekanik olarak sıkıştırılması,
- Beton plak yüzeyinin enine fırçalama ile pürüzlendirilmesi,
- Beton plak yüzeyine kür malzemesi uygulanması,
- Verilen derz aralığına bağlı olarak enine büzülme derzlerinin kesilmesi, enine inşaat derzlerinin oluşturulması,

- Şerit genişliğine bağlı olarak, betonun tek geçişte dökülmesi durumunda boyuna eğilme derzi kesilmesi, iki geçişte dökülmesi halinde boyuna inşaat derzi oluşturulması.
- Bitümlenmiş kayma demirlerinin enine derzlere yerleştirilmesi, bağlantı demirlerinin boyuna derzlere yerleştirilmesi,
- Derzlerin doldurulması,
- İnşaat süresince yağmur, donma ve diğer hasarlara karşı önlem alınması.

• Kullanılacak Malzeme

Çimento: EN 197-1 'e uygun portland çimentosu CEM 42.5

Su: Betonda kullanıma uygun temiz su.

İnce Agrega: Doğal kum ve kırnakum kullanılmalı.

Kuru ağırlık olarak tane boyu dağılımı: 2mm elekte kalan: s %30,

İnce malzeme (< 0.063 mm): $\leq$ %5

2 mm ile 0.063 mm arasındaki tane boyu dağılımı aşağıda verilmiştir:

Elek açıklığı (mm)	Yığılımlı kalan (%)
1	5-35
0.50	20-65
0.25	55-90
0.125	95-100
(kırma kum için 75-100)	

Kum Eş değeri: ≥ 70

İri Agrega: Doğal kırmataş.

Tane boyu dağılımı: 32 mm elekten geçen: %100,

0.063 mm elekten geçen: $\leq$ %1

Küresel tane: $\leq$ %7

Los Angeles kaybı: $\leq$ %25

Cilalanma değeri: $\geq$ %50

Kimyasal Katkılar: Taze betonun işlenebilmesini arttırmak için akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı gerekebilir. Betonun donma-çözölmeye ve buz çözücü tuzlar kullanılması durumunda yüzey soyulmasına karşı direncini arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanılmalıdır. Farklı katkıların birbiri ile uyumu önemlidir.

Derz Dolgu Malzemesi: Sıcak uygulanan bitümlü malzemeler veya soğuk uygulanan iki bileşenli malzemeler. Ayrıca, boyuna derzlerde şekil verilmiş neopren profiller de kullanılabilir.

Kayma Demirleri: Enine derzlerdeki yük transferini sağlayan kayma demirleri 25 mm çapında, 60 cm uzunluğunda 5 220a çeliğinden yapılmış düz çubuklardır. Betonla aderansın önlenmesi ve korozyona karşı korunma için bitümlü bir emülsiyon, reçine kökenli vernik veya plastik kılıfla kaplanırlar.

Bağlantı Demirleri: Boyuna derzlerde kullanılan 12 mm çapında, 100 cm uzunluğundaki bağlantı demirleri S 500a çeliğinden yapılmış nervürlü çubuklardır.

Sehpalar: Kayma ve gerekirse bağlantı demirlerinin yerden istenilen yükseklikte yerleştirilmelerini sağlayan pürüzsüz çelik telden yapılmış mesnetlerdir.

- **Beton Karışımı**

Minimum çimento içeriği: 375 kg / m³ , Maksimum su-çimento orantısı: 0.45

Betonda 28 günlük karakteristik basınç dayanımı: > 30 MPa (en az C30)

Tavsiye edilen çökme değeri: Kayar kalıp finişer için 3 cm

Minimum hava içeriği: %3 olmalıdır.

Müteahhit beton karışımını 1m³ de ağırlık olarak önerirken aşağıdaki bilgileri de ekleyecektir:

Kullanılan malzemenin karakteristikleri, agreganın tane boyu dağılım grafikleri, taze betonun karışım hazırlandıktan 30 dakika sonraki çökme değeri, 7 ve 28 günlük bas dayanımları, betonun kuru birim ağırlığı, beton santralının konumu, tipi ve kapasitesi, beton, taşınma şekli.

- **Beton Dökümü**

Ekipman: Kayar kalıp finişer kullanılması zorunludur. Beton plağı iki geçişte dököbilmek için finişerin çalışma genişliği en az 6 m olmalıdır. Finişerde serilen

betonun yüzey düzgünlüğünü sağlayacak metal plaka bulunmalıdır. Bazı finişerlere kayma demiri yerleştirici ve otomatik yüze fırçalama ekipmanı monte edilebilir.

Beton Döküm Koşulları: Beton, finişerin açıklığı ayarlandıktan sonra tek geçişte serilir. platform genişliği iki geçiş gerektiriyorsa önce aşağıda olan kısım (yolun dış bölümü) serilmelidir. Beton yüzeyine su püskürtülmemelidir.

Hava sıcaklığının sabah saat 8:00 de yerden 1.5 m yükseklikte 1 °C dan veya gece - 3 °C dan daha soğuk olduğu koşullarda beton dökümüne izin verilmemelidir. Beton, dökümünden itibaren 72 saat süre ile donmaya karşı korunmalıdır: beton yol yüzeyindeki sıcaklık +1 °C altına düşmemelidir.

Sürekli yağmur veya sağanak sırasında beton dökümüne ara verilmelidir. Müteahhit taze betonun yağmurdan zarar görmemesi için her türlü tedbiri almakla yükümlüdür.

Not: İşin başlangıcında beton karışımında arazi koşullarına göre gerekebilecek ayarlamaları yapmak ve finişer ile çalışma düzenini yerleştirmek için yolun ilk 50-100 m uzunluğundaki bir bölümü test amacı ile kullanılmalıdır.

- **Yüzey İşlemleri ve Kür**

Sıkıştırıldıktan sonra finişerin arkasından kalıplanmış olarak çıkan taze betonun yüzeyi master ve malalar ile iyice düzlenir. Hemen sonra sert bir plastik süpürge ile enine fırçalanarak yüzey pürüzlendirme işlemi tamamlanır.

Taze beton döküldükten sonra 2 saat içinde çeşitli etkilere karşı korunmalıdır. Su kaybı ve kurumaya karşı etkili bir kür kimyasalı beton yüzeyine yeterli miktarda (en az 150 g / m²) püskürtülmelidir. Bu işlem beton dökümünden sonra 72 saat boyunca etkinliğini korumalıdır.

Ayrıca, betonun bakımı sürecinde ve sonraları, trafiğe açılmadan önce oluşabilecek çatlaklar ile yüzey soyulmasına karşı dikkatli olunmalıdır.

Özel hava koşulları (anormal sıcaklık, bağıl nem miktarları, gece gündüz sıcaklık farkı, rüzgarhızı) yoğun kürlenme, temele su püskürtülmesi gibi ilave önlemler alınmasını gerektirebilir.

- **Derzler**

Enine Büzülme Derzleri: Enine derzler beton özellikleri ve hava koşullarına bağlı olarak beton dökümünden 6 – 24 saat arasında kesilir. Derz kaplamanın 1/3

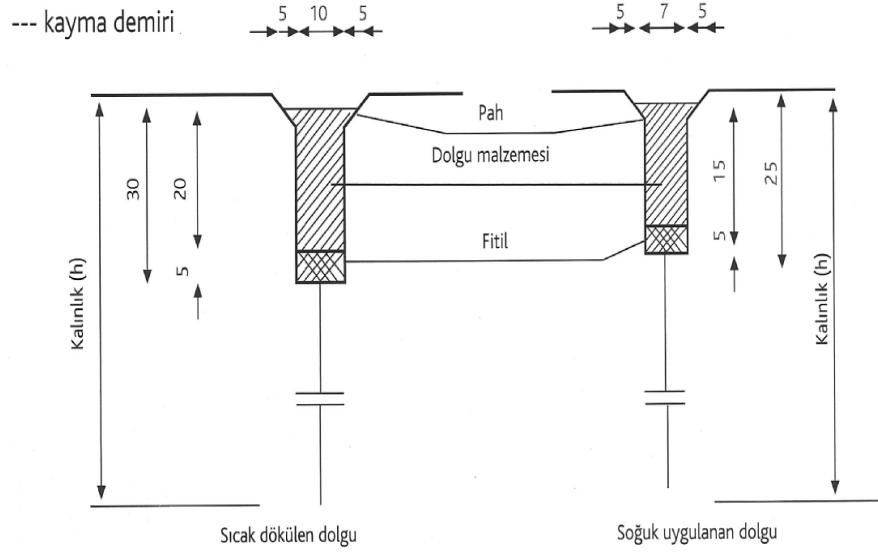
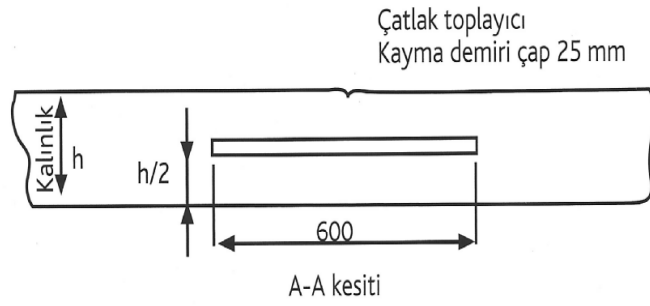
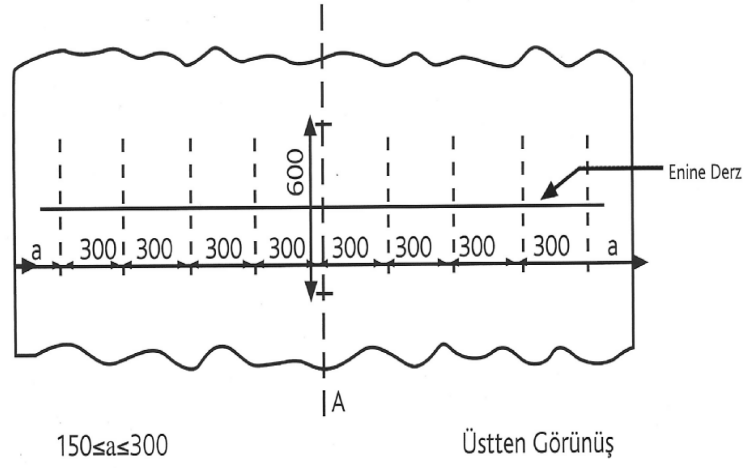
derinliğine kadar kesilmelidir. Çatlakların bu zayıflatılan kesitte toplanması sağlanmış olur. Derzler arasındaki mesafe 5 m dir.

Beton dökümünden önce kayma demirleri 30 cm aralıklarda sehparın üzerine dizilir, sehparlar da yol boyunca ve enine derz hizasına gelecek şekilde temel tabakası yüzeyine tespit edilir. Bu işlemler sonucu beton dökülürken sehparların yerlerinden oynamamaları ve kayma demirlerinin yolun orta çizgisine paralel ve plak yarı yüksekliğindeki konumlarının değişmemesi sağlanmış olmalıdır. (Alternatif olarak, kayma demirleri sehpa kullanmadan taze beton içine titreşimle yerleştirilebilir. Bu durumda beton kamyonları finişer önüne daha rahat yaklaşabilir).

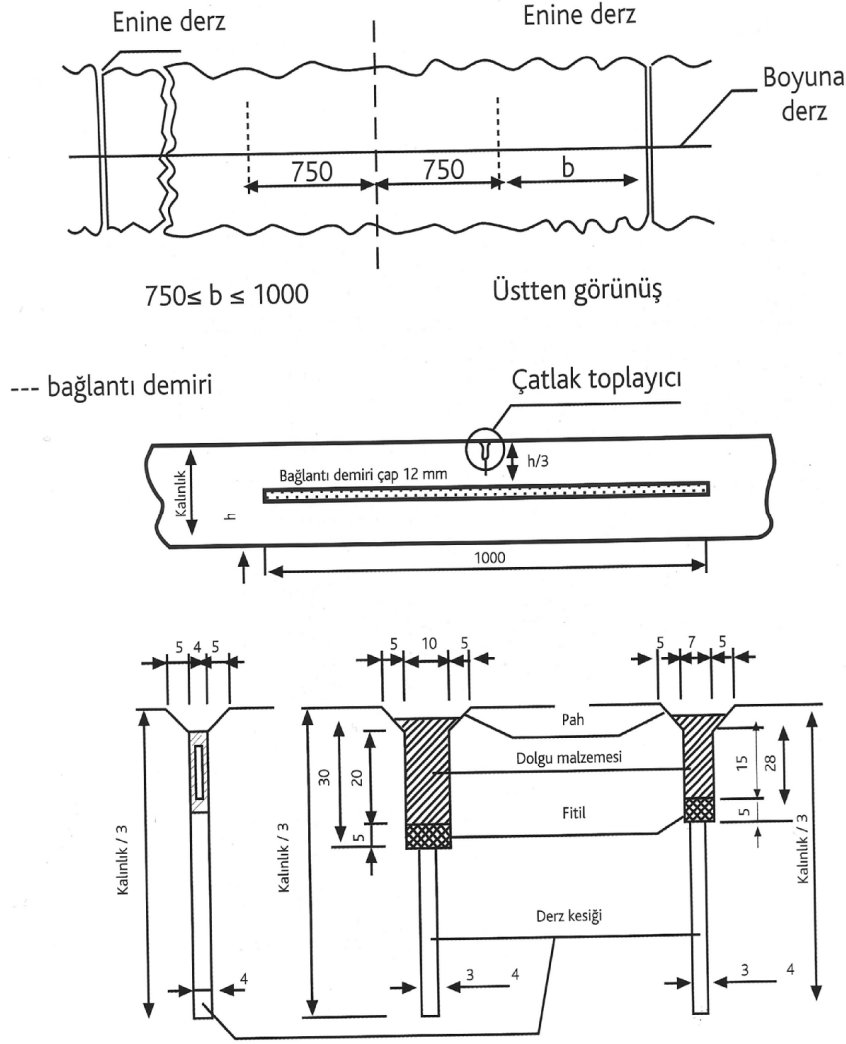
Enine büzülme derz detayları Şekil 4.28’da gösterilmiştir. İşe başlandığında, işe ara verildiğinde ve iş bitiminde oluşacak enine inşaat derzleri için de benzer uygulama yapılır

Boyuna Derzler: Eğer beton dökümü 12m eninde tek geçişte yapılacaksa boyuna derz eğilme derzi olarak kesilecektir. Bağlantı demirleri 75 -100 cm aralıklarda vibrasyonla taze beton içine yerleştirilir veya gene sehparlar kullanılır. (Şekil 4.29)

Eğer beton dökümü iki geçişte yapılacaksa boyuna derz inşaat derzi olacaktır. Bağlantı demirleri, ilk şerit döküldükten sonra sertleşmiş plak yarı yüksekliğinde delinerek açılan deliklere yarı boylarına kadar sokularak reçine bileşimi ile tutturulur, ikinci şerit açıkta katan yarı boyları üzerine dökülür.



Şekil 4.28: Enine derz detayları [21]



Şekil 4.29: Boyuna derz detayları [21]

Derzlerin Doldurulması: Derzler ağızları genişletildikten hemen sonra doldurulur. Bununla birlikte yağmur yağarken veya hava sıcaklığı 5 °C'ın altında olduğunda derzlerin doldurulmasına izin verilmez.

Derz doldurulması şu işlemleri kapsar: Derz oluşunun toz ve kirden temizlenmesi, sıcak hava ile kurutulması, oluk tabanına silindirik (veya prizmatik) polimer fitil yerleştirilmesi, dik kenarlara yapışkan vernik sürülmesi ve fitil üzerine dolgu malzemesinin (sıcak dökülen veya soğuk uygulanan) konulması. İşlem sonunda dolgu malzemesinin üst yüzeyi beton plak yüzeyinde en fazla 5 mm derinlikte olmalıdır.

- **Kalite Kontrolü**

Müteahhit kullanılacak bütün malzeme ve ekipmanı idarenin teknik onayına sunacaktır.

İnşaat öncesinde, sırasında ve sonrasında aşağıdaki işlemler yerine getirilecektir:

- Taze betonun kontrolü (çökme, hava miktarı)
- Sertleşmiş betonun kontrolü (basınç dayanımı)
- İş sırasındaki kontroller (uygulama, kür, derz kesme ve doldurma,...)

Beton yolun Afyon-Emirdağ Ayrımı Yolu 5+700 ile 7+700 km arasında yapılmasının kesinleşmesi ve ilgili proje ile teknik şartnamenin hazırlanmasından sonra TÇMB, hava alanı inşaatlarında deneyimi olan üç inşaat firması ile temasa geçerek kendilerinden teklif istemiştir.

TÇMB, Belçikalı bir uzmanı yol yapımının başlangıç ve bitiş günlerinde inşaat mahallinde hazır bulunmak üzere danışman olarak görevlendirmiştir.

Yolun alt yapısı KGM tarafından yapılmış olduğundan İş Programı'ndaki hazırlıklar daha ziyade yörede teknik şartnameye uygun agrega kaynaklarını araştırmak, gerekli deneyleri yapmak, beton karışımını belirlemek ve demir işlerini tamamlamak üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca, Afyon'daki hazır beton tesisleri ziyaret edilerek kapasiteleri ve kullandıkları agregalar hakkında bilgi alınmıştır.

Kullanılacak kayar kalıp finişerin betonu serme kapasitesi ve çalışma hızı dikkate alınarak Afyon'daki iki hazır beton firması ile birlikte çalışılmasına karar verilmiştir.

Yörede bulunan ve beton karışımında kullanılması düşünülen çimento ve agregalardan alınan numuneler Ankara'ya getirilmiştir. Numuneler Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı (DLH) Genel Müdürlüğü Laboratuarlarında gerekli deneylere tabi tutularak standartlara ve teknik şartnameye uygunlukları kontrol edilmiştir. Teknik şartnamede istenilen özelliklere haiz beton karışımı elde etmek için karışım hesapları yapılmıştır. Çalışmaların bir bölümü de TÇMB Laboratuarlarında tekrarlanmıştır.

Beton karışımında kullanılmasına karar verilen malzeme ve uygulanan beton karışımı ile ilgili bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

Beton Karışımında Kullanılan Malzeme

Çimento: Afyon Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM 1 (PÇ 42.5) çimentosu özelliklerinin standarda uygun olduğu laboratuarlarda kontrol edildi. Bazı tipik değerler şöyle sıralanabilir:

Kükürt Trioksit: % 2.95, Klorür: % 0.015, Çözünmeyen Kalıntı: % 1.48

Sodyum Eşdeğeri Toplam Alkali : % 0.714, Özgül Yüzey: 342 m² / kg

Priz Başlangıç — Bitiş : 3 saat 20 dk. - 4 saat 10 dk.

Basınç Dayanımı: 23.6 MPa (2 gün), 50.7 MPa (28 gün)

Toplam alkali değeri alkali-silika reaksiyonu ihtimaline karşı dikkatli olunmasını gerektiriyordu.

İri Agrega: Hazır beton santrallerinde ayrı ocaklardan elde edilen kalker kırma taşı kullanılıyordu. Kırma taşların bazı özellikleri arasında ufak farklılıklar olduğu saptandı: Bazı tipik değerler şöyle sıralanabilir:

Los Angeles Aşınma Kaybı : % 22 -24, Dona Karşı Direnç (Na₂SO₄): %0.5

DYK Özgül Ağırlık: 2.69, Su Emme: % 0.4 – 0.6,

İnce Agrega: Hazır beton santrallerinde iki ayrı ocaktan elde edilen kalker kırma kumuna ait Sincanlı Deresi doğal kumu da kullanılmaktaydı. Bazı tipik değerler şöyle sıralanabilir:

Kırma Kumlar: Dona Karşı Direnç: % 1.8, DYK Özgül Ağırlık: 2.70

Su Emme: % 0.4 -0.5, Kum Eşdeğerliliği: % 88.4, İncelik Modülü: 3.3 -3.6

Doğal Kum: Dona Karşı Direnç: % 2.0, DYK Özgül Ağırlık: % 2.61

Su Em ise: % 0.4, Kum Eşdeğerliliği: %71.7, İncelik Modülü: 2.8

Kullanılan Beton Karışımı

Laboratuarda beton karışımı denemelerine başlamadan önce Afyon çimentosu ve ince agrega kullanılarak hazırlanan numuneler ile “Hızlandırılmış Alkali-Silika Reaksiyonu” deneyi yapıldı. Kanada Standardı CSA A23.2-25A’ya göre yapılan deneyde çubuk numunelerde boy uzamasının 14 günde % 0.15 ‘i geçmemesi öngörülmektedir. Aksi halde kullanılan çimento ve agrega ilerde betonda zararlı genleşmelere neden olabilecektir.

Yapılan deneyler sonucu numunelerde 14 günlük boy uzamaları kırma kumlar ile % 0.0258 ve %0.0307, doğal kum ile ise % 0.2229 bulunmuştur. Dolayısı ile kırma kumlar zararsız kabul edilirken doğal kum miktarına sınır getirilmesi gerekmiştir. Doğal kum miktarı % 30 oranına azaltıldığında genleşme % 0.1419' a indi ve karışımda doğal kumun bu miktarı geçmemesi kararlaştırılmıştır.

Beton karışımı denemelerinden önce ve denemeler sırasında kaba, orta ve ince boy halinde kullanılan kırmataş ile dere kumunun tane boyu dağılımları kendi içlerinde ve farklı oranlarda birleştirilerek belirlenmiştir, standartta ve teknik şartnamede öngörülen sınırlamalara uyulmaya çalışılmıştır.

Müteahhit firmanın önerisi üzerine beton karışımlarında bir miktar silis dumanı kullanılması da uygun görülmüştür.

Teknik şartnamede çökme değeri 3 cm, hava içeriği en az % 3 ve su-çimento orantısı en fazla 0.45 olan C30 sınıfı bir beton öngörülmüştür. Bu nitelikleri sağlamak için beton karışımında hava sürükleyici kimyasal katkı kullanılması gerekmiştir. İstenilen işlenebilme ise akışkanlaştırıcı katkı kullanmadan elde edilebilmiştir. Laboratuarda belirlenen ve istenilen niteliklere haiz beton karışımı Afyon'da hazır beton tesislerinde uygulanmıştır.

Transmikserlerle inşaat mahalline getirilen beton üzerinde yapılan deneyler çökme ve hava miktarlarının tam olarak istenilen değerlerde olmadığını göstermiştir. Dolayısı ile yol inşaatının ilk saatlerinde dahi arazideki sonuçlara göre beton karışımında bazı ayarlamalar yapılması gerekmiştir. Bu arada inşaat mahallinde dökülen beton plak numunelerde büzülme davranışı incelenmiştir ve çatlak oluşmadığı gözlenmiştir.

• Sonuç olarak, betonda kullanılan malzeme miktarları aşağıdaki şekilde (kg / m³) olarak belirlenmiştir:

Çimento: 375, Su: 176

(Su / Çimento : 0.47)

Silis Dumanı: 17.5

Hava Sürükleyici Kimyasal Katkı : 0.20

Kırma Taş (12-38mm): 865,

Kırma Taş (6-12 mm) : 314

Kırma Kum (0-6 mm): 159,

Doğal Kum (0-3 mm): 411

• Bu karışımla elde edilen betonun özellikleri günlük okumaların ortalamaları ile en düşük ve en yüksek değerler olarak aşağıda belirtilmiştir:

Çökme: 4 ± 1 cm Hava: % 4 ± 1

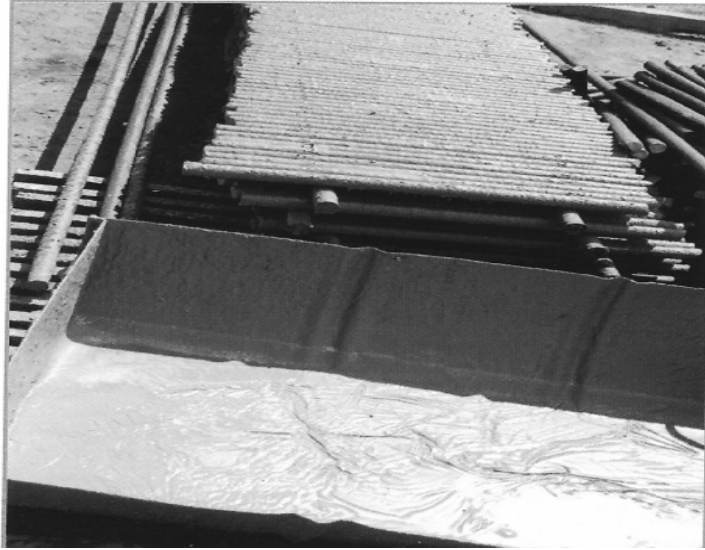
Basınç Dayanımı: 7 Günde: 36.6 MPa (34.1–40.1) MPa

28 Günde: 48.6 MPa (44.7–51.2) MPa

Kayma ve Bağlantı Demirlerinin Hazırlanması

Kayma Demirleri: Kayma demirleri iç piyasadan 28 mm çapında düz demir olarak temin edilmiştir . Demirler 60 cm boyunda çubuklar oluşturmak üzere kesilmiştir.

Kayma demirleri antipas boyaya batırılmıştır (şekil 4.30) ve daha sonra önceden hazırlanmış çelik tel sehpalar üzerine 30 cm aralıklarla dizilerek bağlanmıştır (Şekil 4.31).

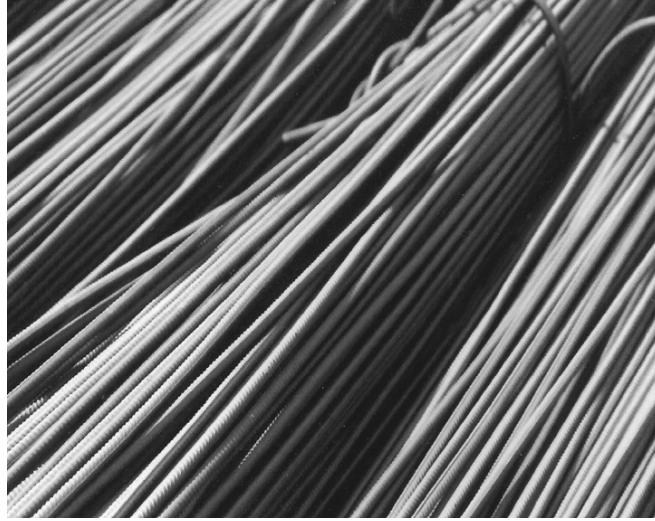


Şekil 4.30: Kayma demirlerinin boyanması [21]



Şekil 4.31: Kayma demirlerinin sehpaye yerleştirilmesi [21]

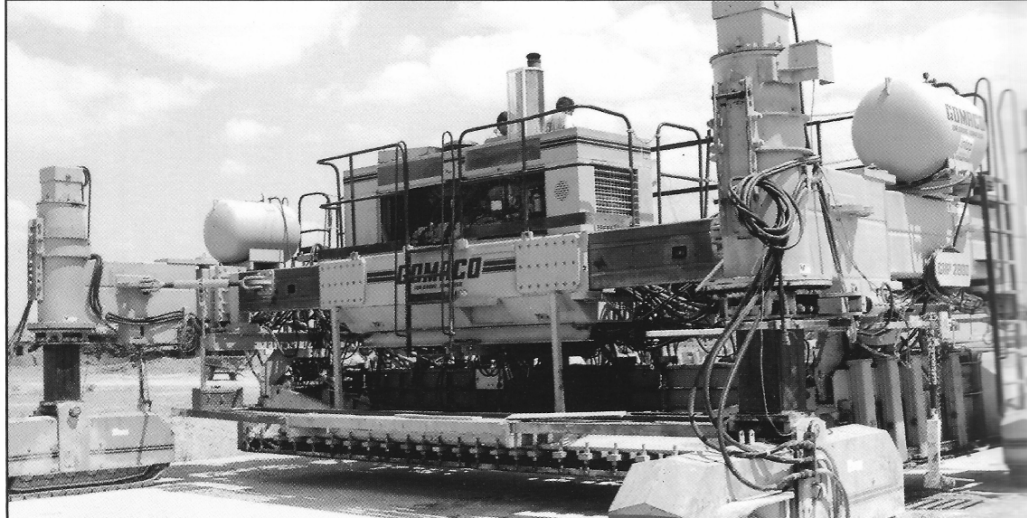
Bağlantı Demirleri: Bağlantı demirleri piyasadan temin edilen 12 mm anma çapındaki nervürlü demirlerin kesilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 4.32). Danışmanın önerisi üzerine boyları 100cm yerine 80 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.32: Bağlantı demirleri (Φ 12 mm) [21]

Kayar Kalıp Finişer

Beton yolun yapımında kullanılması öngörülen kayar kalıp finişer Afyon'a bölümler halinde getirilmiştir ve inşaat mahallinde montajı tamamlanmıştır (Şekil 4.33). GOMACO firmasının GP 2800 model finişer yolun yapımında taşeron elemanları tarafından kullanılmıştır.



Şekil 4.33: Kayar kalıp finişer [21]

Son Hazırlıklar

Yolun yapımına başlamadan önce orta refüj bordürleri sökülüştür. Projede beton plak kalınlığı 27 cm olarak öngörülmüştür. Finişerin bu kalınlığa göre betonu serip sıkıştırması için istenilen şerit genişliğini de dikkate alarak kılavuz çubukları çakılmıştır ve kılavuz teli gerilmiştir (Şekil 4.34). Mevcut yol yüzeyi kısmen engebeli olduğu için çukur yerlerde beton plak kalınlığı zorunlu olarak 27 cm' den fazla olmuştur.



Şekil 4.34: Kılavuz telinin gerilmesi [21]

Beton yolun yapımına 28 Mayıs 2004' de başlanmıştır. Önce mevcut yol yüzeyi basınçlı hava ile tozdan arındırılmıştır. Yol genişliği 12 m olduğundan beton, finişerin iki geçişi ile serilmiştir. İlk geçişin 7.5 m genişliğinde sağ (ağır trafik) tarafında olmasına, 4.5 m genişliğindeki ikinci geçişin de eğimden dolayı yukarıda kalan kısımda olmasına karar verilmiştir. Kılavuz çubukları da buna göre çakılmıştır.

Finişer ilk geçiş için yolun sağına yanaştı ve algılayıcısı kılavuz teli ile irtibatlandırılmıştır. Bu sırada hazır beton tesislerinde transmikserler yüklenmiştir. Transmikserlerle gelen beton finişerin önüne boşaltılmıştır ve daha sonra işçiler ve finişerin ön helezon şaft yardımı ile geçiş genişliğine yayılmıştır.

Kayma demirlerinin bulunduğu sehpalar 5 m aralıklarla yol yüzeyine çakılmıştır. Dökülen betonun sehpaları yerinden oynatmamasına özen gösterilmiştir. Gelen her beton partisi üzerinde çökme ve hava miktarı deneyleri yapılmıştır. Uygun olmayan beton santralına telefonla bildirilerek beton karışımında gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Ayrıca beton partisi bekletilerek veya yeni bir beton partisi ile karıştırılarak uygunsuz sonuçların iyileştirilmesine çalışılmıştır. Kısa bir süre sonra da betonda çökme ve hava miktarları istenilen düzeye gelmiştir. Basınç dayanımı kontrolü için de periyodik olarak numuneler alınmıştır.

Yavaşça ilerleyen finişer, üzerinden geçtiği taze betonu mekanik olarak sıkıştırmıştır ve beton arkadan kalıplanmış olarak çıkmıştır. Bu sırada betonun yüzeyi işçiler tarafından mala ve çelik mastar ile düzlenmiştir.

Hemen sonra beton yüzeyinin fırça ile enine pürüzlendirilmesine geçilmiştir. Bu işlem finişerin arkasından gelen pürüzlendirme birimi tarafından mekanik olarak gerçekleştirilmiştir. Pürüzlendirilmeden sonra beton yüzeyine kür kimyasalı püskürtülmüştür. Bu işlem el ile veya gene mekanik olarak yapılabilmiştir.

Bağlantı demirleri plak yarı yüksekliğinde yarı boylarına kadar ve 100 cm aralıklarla taze betonun içine batırılmışlardır.

İlk günün sonunda başlangıç zorlukları nedeniyle beton plak sadece 110 m mesafeye kadar dökülebilmiştir. Derzlerin kesimi beton yeterince sertleştikten sonra, ancak 24 saat içinde gerçekleştirilmiştir. Enine derzler 5 m aralıklarla alttaki kayma demir sehpalarının hizasından, kayma demirlerine dik olarak yaklaşık 9 cm derinliğe kadar kesilmiştir. Bu şekilde zayıf kesit oluşturulup çatlakların burada toplanması sağlanmıştır.

Boyuna eğilme derzi ilk dökülen 7.5 m genişliğinde plağı ortalayarak kesilmiştir. İlâveten 7.5 ve 4.5 m genişliklerde ayrı ayrı dökülen plaklar arasında ve bağlantı demirlerine dik olarak boyuna inşaat derzi oluşturulmuştur. Daha sonra derz genişletme ve pah açma işlemlerine geçilmiştir. Başlangıçta 1-2 mm olan derz kalınlığı özel testere ile 7-8 mm'ye çıkarılmıştır. Daha sonra başka bir testere ile pah açıldı ve derz ağızları toplam 17 mm'ye kadar genişletilmiştir.

Derzler basınçlı hava ile temizlenip kurutulduktan sonra içlerine polimer fitiller bastırılarak yerleştirilmiştir. Daha sonra yapıştırıcı sürüldü ve iki bileşenli soğuk uygulanan dolgu maddesi ile derzler doldurulmuştur. Beton yolun yapımı tamamlandıktan sonra başlangıçta sökülmüş olan refüj bordür taşları tekrar yerleştirilmiştir. Düşük kalmış olan banket de önce plent miks ile dolduruldu, sonra asfalt ile kaplanmıştır. İki km uzunluğundaki beton yolun yapımı 17 Haziran 2005 tarihinde tamamlanmıştır.

4.7.3 Özet

Türkiye'deki ilk beton karayolu TÇMB tarafından finanse edilmiş ve bir Türk müteahhit firması tarafından başarı ile inşa edilmiştir. Beton yolun ilk maliyetinin asfalt yola yakın olması beton yolların yapımının Türkiye için de uygun olduğunu göstermiştir. KGM bölünmüş yolun diğer kısmının asfalt betonu yapacağını bildirmiştir. Bu sayede çimento betonu ve asfalt betonu yolların aynı şartlar altında karşılaştırılması mümkün olacaktır.

1950 yılındaki kuruluşundan günümüze dek KGM sadece asfalt yollar yapmıştır. KGM personeli ve karayolu müteahhitleri asfalta alıştığından dolayı, beton yol yapımı gibi yeni bir teknolojiye karşı biraz da çekingenlik ve kararsızlık oluşmuş bulunmaktadır. Bu psikolojik etkinin yanı sıra beton yolun asfalttan daha pahalı olduğu yönündeki yanlış düşünce bugüne kadar ülkemizde beton yolların yapımını engellemiştir. Afyon'daki beton yol yapıldıktan ve denendikten sonra beton yolların Türkiye'de de özellikle ağır trafik yükü olan, zayıf zemin özellikleri gösteren, sıcak iklimli bölgelerde tercih edileceği umulmaktadır.

Sonuç olarak Afyon'da ilk beton karayolunun yapılmasının ülkemizde inşaat mühendisliğinin bu alanında gerçekten önemli bir gelişmenin başlangıcı olarak sayılabileceğine inanılmaktadır. [21]

4 RİJİT ÜSTYAPILARDA KULLANILAN MALZEME BİLEŞİMLERİ

Rijit üstyapı tasarımını sağlıklı olarak gerçekleştirilebilmesi için üstyapının kaplanmasında kullanılacak betonun ve betonu meydana getiren bileşenlerinin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gereklidir.

Beton genel olarak hava, agrega ve çimento hamurundan ibarettir. Çimento hamuru, su ve çimentonun belirli bir oranda karıştırılması ile elde edilir. Su ve çimento kimyasal reaksiyon yaparak sertleşmekte ve agrega danelerini bağlayarak karışımı yapay bir taş haline getirmektedir. [1]

İdeal bir beton için aşağıdaki üç husus aynı anda sağlanmalıdır:

- Mukavemet
- İşlenebilirlik
- Durabilite

Bu temel özellikleri sağlayan en ekonomik üstyapı betonunun üretilmesi esastır.

5.1 Çimento Bağlayıcılar

Çimento, su ile karıştırıldığında, az veya çok akıcı niteliğe kavuşan, sadece suyun etkisiyle priz yapan, katılaşan ve nihayet sertleşen ince taneli malzemedir. Çimento hamuru, katılaşması sırasında agrega danelerini birbirine bağlamak ve zamanla sertleşme yeteneğinden dolayı mukavemet kazanma özelliğine sahiptir. Betonun mukavemeti çimento tarafından sağlandığından çimentoya ait özelliklerin de iyi bilinmesi gerekir.

5.1.1 Çimento Özellikleri

Çimentonun; fiziksel özellikleri, mukavemet ve rötre özellikleri rijit kaplamalar için büyük önem taşımaktadır.

5.1.1.1 Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Aşağıdaki bölümlerde, genel hatlarıyla çimentolarda aranan fiziksel özellikler verilmiştir:

- **İncelik:** Çimentonun bağlayıcılık özelliğini kazanabilmesi için klinkerlerin çok ince olarak öğütülmesi gereklidir. Çimento ne kadar çok öğütülürse;
 - Hidratasyon hızı artarak özellikle ilk 7 günde mukavemet artışı hızlanır,
 - Hidratasyon ısısı artarak çatlama ve rötre fazlaşır,
 - Aynı ağırlıktaki çimentonun tane sayısı artacağından agregayı sarma miktarı artarak daha güçlü aderans sağlanır.

Sonuç olarak klinker çimentonun mukavemeti için yeterince öğütülmeli fakat hidratasyon ısını artırılmamak için fazla öğütülmemelidir. Çimentonun inceliği, belirli elekler üzerinde yüzde kalan miktarlar ve özgül yüzey alanının bulunması ile tayin edilir.

- **Hacim Genleşmesi:** Çimentonun hacimce genleşme miktarı, sertleşmiş çimentonun dayanıklılığının göstergesidir. Prizden sonra sertleşen çimentonun hacimce genleşmesi arzulanmaz. Zira fazla genleşme, çimentodaki serbest kireç ve MgO miktarının fazla olduğunu göstermektedir. Bu maddeler suda çözündüğünden betonun mukavemeti ve durabilitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Betonun genleşmesine neden olan serbest oksitler, çimento hamurunun genleşmesi ile ölçülür ve belirli bir değeri geçmemesi istenir.

- **Priz Süresi:** Çimentonun prize başlaması ne çok erken ve prizini tamamlaması da ne çok geç olmalıdır. Aksi halde çimento normal hidratasyonunu yapamayacaktır. Her ne kadar priz başlangıç süresi klinkere katılan alçı taşı (jibs) ile ayarlanabilirse de priz sonu süresi ise tamamen çimentonun kalitesi ile ilgilidir. Priz başlangıcı, çimento kıvamının değişime başladığı anı ve priz sonu ise plastikliğini yitirdiği anı ifade etmektedir.

Belirli bir çimentonun priz süresine etki eden başlıca faktörler;

- Sıcaklık
- w/c oranı
- çimentonun kullanmadan önce uzun süre bekletilmesi

olarak sayılabilir. Ortam ısısı artıkça kimyasal bir reaksiyon olan hidratasyonun da artmasına neden olunduğundan priz süresi kısılacaktır. Çimentoya katılan su miktarı artıkça priz süresi de uzar. Çimento kullanılmadan önce uzun süre bekletilmişse rutubet kaparak prizin geç başlamasına neden olmaktadır. Genel olarak, priz başlangıcı 1 saatten az ve priz sonu ise 8-10 saatten fazla olmamalıdır.

- **Kızdırma (Isıtma) Kaybı:** Kızdırma kaybı miktarı her ne kadar çimentonun kimyasal özelliğini yansıtsa da çimentonun fiziksel olarak uygun olmayan bekletilme sonunda rutubet kapmış olmasının tespit edilmesinde de yararlıdır. Bunun için çimento numunesi 900⁰C ile 1000 ⁰C de sabit ağırlığa erişene kadar kızdırılır ve ağırlık kaybı tespit edilir. Eğer bu kayıp fazla ise çimentoda rutubetlenme ve karbonatlaşma olduğunu gösterir. Kızdırma kaybı standartta belirtilen üst sınırdan fazla olmamalıdır.

- **Özgöl Ağırlık ve Yoğunluk:** Portland çimentolarının özgöl ağırlığı genel olarak 3,15 iken katkılı çimentolarda ise 2,90'nın üzerindedir. Yoğunluk ise gevşek halde 830 kg/m³ iken vibrasyon ile konsolide edildiklerinde 1650 kg/m³ olup hesaplamalarda 1800 kg/m³ olarak alınmaktadır.

- **Çözünmeyen Kalıntı:** Çözünmeyen kalıntı çimento hammaddelerinin pişme derecesi, gayri safi maddelerin miktarı, mineral katkıların oranı, vb. konularda bilgi verir. Çözünmeyen kalıntı miktarı standartta belirtilen üst sınırdan fazla olmamalıdır.

5.1.1.2 Çimentonun Mukavemet Özellikleri

Çimentoya su katılarak elde edilen plastik kıvamdaki hamur zamanla katılaşır ve daha sonra sertleşmeye yani mukavemet kazanmaya başlar. Çimentonun mukavemet kazanma olayı;

- Hidratasyon (çimentonun suyla yaptığı reaksiyon veya kimyasal olay)
- Katılaşma (fiziksel olay- priz süresi)
- Sertleşme (mekanik olay-mukavemet artış hızı)

olmak üzere 3 evreden meydana gelir.

- **Hidratasyon:** Kimyasal bir olay olan hidratasyon aşağıdaki özelliklere sahiptir;
 - Çimentonun suyla tam olarak hidratasyon yapabilmesi için klinkerin çok ince olarak öğütülmesi gerekir.

- Hidratasyon olayı zamanın bir fonksiyonu olduğundan çimentonun ana bileşiklerinin suyla yaptığı reaksiyonu çok uzun hatta senelerce sürer. Suyla temas eden betonlarda sürekli bir mukavemet artışı olmaktadır.
- Hidratasyon sırasında kimyasal reaksiyonlar ile ısı açığa çıkar. Buna hidratasyon ıslısı denir. Hidratasyon ıslısı başlangıçta daha çok iken daha sonraları azalmakta ancak yayılan toplam ısı zamana bağlı olarak artmaktadır.
- Silikatlar suyla reaksiyon yaptıktan sonra serbest kireç açığa çıkarılır daha sonra alüminantlar bu serbest kireçte reaksiyona girerek jelleri meydana getirirler. Özellikle C_3A çok hızlı hidratasyon yaptığından büyük bir ısınin açığa çıkmasına ve priz in çabuklaşmasına neden olur. Bu nedenle, klinkere jibs (alçı taşı) katılarak ani priz (flash) olayı geciktirilir.

Hidratasyon olayına etki eden en önemli faktörler;

- Çimentonun aşırı ince öğütülmesi,
- Çimento ana bileşiklerinden C_3A ve C_2S 'i aşırı olması sayılabilir. Tablo 5.1'de çimentonun yaydığı hidratasyon ıslısı görülmektedir.

Tablo 5.1: Çimento Bileşiklerinin Yayıdıkları Hidratasyon ıslıları [1]

Ana Bileşik	Hidratasyon ıslısı, Kalori/g	
	48 Saatte	Hidratasyon Sonunda
C_3A	150	207
C_3S	100	120
C_4AF	40	100
C_2S	10	62

Hidratasyon ıslısı en fazla alüminli çimentolarda ve en azda katkılı özellikteki yüksek fırın cürufu çimentolarda rastlanır. PÇ 42.5 ve 52.5 tipi çimentolar daha çok öğütüldüklerinden PÇ 32.5'a göre fazla hidratasyon ıslısı yayarlar.

- **Priz (Katılma):** Çimento hamurunun katılmaya başlaması ile plastikliğini kaybetmesi arasında geçen süreye priz denilir. Beton priz başlangıcından önce kalıbına konup yerleştirilmeli ve priz süresince aşırı su kaybını önlemek için kür (koruma) uygulanmalıdır. Sıcaklık, su miktarı, çimentonun kullanılmadan önce bekletilmesi gibi hususlar priz süresi üzerinde önemli rol oynarlar. Alkali agrega reaktivitesine yol açan alkali oksitlerin (Na_2O ve K_2O) çimentoda fazla olması priz in çabuk başlamasına neden olur.

- **Sertleşme (Mukavemet Kazanımı):** Priz olayından sonra meydana gelen hidrate elemanlar çok boşluklu olup sertleşme sırasında meydana silikat hidrate kristalleri zaman içinde büyüyerek kılcal boşlukları doldurması ile çimento mukavemet kazanmaya başlar ve başlangıçta hızlı daha sonraları yavaş bir şekilde mukavemet artar. Çimentoların mekanik mukavemeti hidrasyon hızına bağlıdır. Dolayısıyla hidrasyon olayını etkileyen tüm faktörler çimentonun mukavemeti üzerinde de etkin olurlar. Mukavemete etki eden hususlar;

- Zamana bağlı faktörler,
- Kür şartlarına bağlı faktörler,
- Çimento özelliklerine bağlı faktörler

olarak sayılabilir. Bunlardan ilk iki faktör beton konusunda detaylı olarak ele alınacaktır. Çimento özelliklerinin mukavemete olan etkileri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çimentonun hidrasyonu ne kadar hızlı ise mukavemet artışı da o kadar hızlıdır.
- Hidrasyon olayı, çimentonun inceliğine ve hızlı hidrasyon yapan bileşiklerin miktarına bağlıdır. Bundan dolayı, farklı cins çimentoların mukavemetleri farklı olabileceği gibi aynı tip çimentoda da farklılıklar olabilir.
- Isı ve rutubet ne kadar fazla ise mukavemet artışı da o kadar fazladır.

5.1.1.3 Çimentonun Rötire Özellikleri

Rötire hacim büzülmesi olayı olup donatı ile betonun aderansını artırması nedeni ile faydalı iken betonda çatlamalara neden olduklarında sakıncalıdır. Rötire;

- Termik
- Plastik (çabuk)
- Hidrolik

olmak üzere ele alınacaktır. Eğer sadece rötire denilirse hidrolik rötire anlaşılmalıdır.

- **Termik Rötire:** Çimento hidrasyonu sırasında çıkan hidrasyon ısısı beton kütlelerinin ısınıp artırmakta ve betonun hava ile temas eden yüzeyi ise soğumaktadır.

Soğuyan kısım büzülmeye çalışırken sıcak olan iç kısım tarafından büzülme engellenmektedir. Bu da çekme gerilmelerini yaratarak betonun çatlamasına neden olacaktır. Bu nedenle, yüksek hava sıcaklıklarında beton dökülmemeli veya bir takım tedbirler alınmalıdır.

- **Plastik (Çabuk veya Erken) Rötire:** Henüz taze betonun prizi sırasında meydana gelen plastik rötire beton dökümünü takip eden günde üstteki donatılar boyunca oluşan kılcal çatlaklar ile kendini gösterir. Özellikle işlenebilirliği düşük katı betonlar yada işlenebilirliği çok yüksek ama yeterince kohezyonu olmayan betonlar kalıba yerleştirildikten sonra vibrasyon etkisi ile terleme (çimento şerbetinin dışa ve agregaların dibine çökmesi olayı) meydana gelir. Kütlemin dış kısmında (hava ile temas eden veya kalıpla temas eden yüzeylerde) terleme ile biriken su buharlaşma ile veya kalıp tarafından emilerek süratle yok olur ve hızlı bir büzülme meydana gelir. Bu da betonda çatlamalara ve donatı ile iri agrega altlarında boşluklar oluşmasına neden olarak aderansın azalması hatta yok olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, işlenebilirlik ne az ne de çok olmalı terlemenin kontrolü için kohezyonu yüksek beton üretilmelidir.

- **Hidrolik Rötire (Kuruma Büzülmesi):** Buna sertleşmiş beton rötresi veya kuruma rötresi adları da verilmektedir. Hidrolik rötire beton üretiminden hemen sonra başlar ve 5-6 ay hatta 1 yıl devam eder. Hidrolik rötrenin nedeni ile ilgili birçok hipotez öne sürülmüş ise de tam olarak nedeni belirlenememiştir. Ancak çimento hamuru su kaybettikçe büzülmeye çalışacak ve rijit malzeme olan agrega bu büzülmeyi engellemeye çalışacaktır. Beton-harç-hamur'a ait tipik rötire miktarı 1-3-7 olarak alınabilir. Görüldüğü gibi, beton içindeki farklı büzülmelerin yaratacağı iç gerilmeler betonun çatlamasına neden olacaktır.

Plastik rötire betondan ve termik rötire ile hidrolik rötire ise çimentodan kaynaklanır. Harç (ince kısım) ve özellikle agrega hacim daralmasına karşı koyar. Dolayısıyla agrega daneleri ne kadar sağlam ise çimentonun daralmasına o kadar karşı koyabilecektir. Dolayısıyla betonda agrega arttıkça çimento miktarı azalacağından dolayı rötrenin de azalması beklenmelidir.

Genel olarak;

- ısı, rüzgar arttıkça ve rutubet azaldıkça yani su kaybı arttıkça
- çimentonun C_2S miktarı, inceliği, hidrasyon ısı ve dozajı arttıkça

- w/c oranı ve karma suyu ihtiyacı arttıkça rötre miktarı artmaktadır.

5.2 Agregalar

Agrega yol kaplamasının stabilitesinden sorumlu olduğu kadar miktar olarak da önemli bir paya sahiptir.        bağlayıcısız temel ve alttemel tabakalarının tamamı, rijit üst yapıların ağırlıkça %70-80'i ve hacimce %60-75'i agregadan sağlanır. Hem kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı hem de çok büyük miktarda gereksinim duyulmasından dolayı agreganın çok önemli bir yol malzemesidir.

Agregalar sınıflandırılırken göz önünde bulundurulması gereken özellikleri şunlardır;

- Mineralojik yapıları,
- Boyut,
 - Kaba agregadan
 - İnce agregadan
 - Filler
- Gradasyon
 - Kesikli gradasyon
 - Yoğun-sürekli gradasyon
 - Boşluklu-sürekli gradasyon
 - Tek boyutlu gradasyon
- Biçim
 - Yuvarlak
 - Yarı yuvarlak
 - Yarı açısal (yarı köşeli)
 - Açısal (köşeli)
- Yüzey yapısı
 - Çok p r zli
 - P r zli

- Düzgün
- Cilalı

Beton Agregalarının Özellikleri

Betonda kullanılan agregaların sahip olduğu özellikler, betonun tüm özellikleri üzerinde etkin bir rol oynar. Bunlar;

- Betonun mukavemeti; agrega mukavemeti, dane şekli ve yüzey yapısı, maksimum dane boyutu, gradasyon, kil içeriği.
 - Betonun yoğunluğu; agreganın özgül ağırlığı, dane şekli, maksimum dane boyutu, gradasyon, yoğunluk.
 - Betonun durabilitesi; agreganın porözitesi, cilalanma direnci, don direnci, aşınma direnci, dane şekli, yüzey yapısı.
 - Betonda rötre; agreganın maksimum boyutu, gradasyon, dane şekli, kil içeriği
- olarak ele alınacaktır. Beton agregalarında aranan temel özellikleri, amaçları ve aranan şartlar Tablo 5.2’de özetlenmiştir.

Tablo 5.2: Beton Agregalarının Özellikleri [1]

ÖZELLİKLER	AMAÇ	ARANILAN ŞARTLAR
Özgül ve Birim Ağırlık	Miks-Dizayn	Beton mukavemeti için her ikisi de büyük olmalı
Dane Biçimi ve Yüzey Pürüzsüzlüğü	İşlenebilirlik ve Aderans	Yassı ve ince kısımlar olmamalı, işlenebilirlik için cilalı ve aderans için pürüzlü olmalı
Absorbsiyon ve Rutubet	Karma suyunun ayarlanması	Absorbsiyon, karma suyunu azaltması bakımından zararlı ama aderans için faydalıdır
İslatma Suyu	Miks-Dizayn	İslatma suyu ihtiyacı az olmalı
Agrega-Çimento Aderansı	Agrega ile çimento hamuru arasındaki bağ	Eğilme mukavemeti için aderans yüksek olmalı
Yabancı Maddeler: Kil ve Silt Organik madde Yumuşak maddeler Yanıcı madde No.200’den geçen kısım	Durabilite, İşlenebilirlik Durabilite, Priz gecikme Durabilite Mukavemet, Durabilite Aderans, İşlenebilirlik	Olmamalı Olmamalı Olmamalı Olmamalı Son derece az veya olmamalı
Dayanıklılık	Aşınma Direnci	Yüksek olmalı
Don Dayanıklılığı	Don Direnci	Yüksek olmalı
Çevre Etkilerine Dayanıklılık	Durabilite	Yüksek olmalı
Porözite	Mukavemet, Don Direnci, Durabilite	Porözite az olmalı
Dane Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü	Mukavemet, Su ihtiyacı, Boşluk oranı	Dere malzemesi; boşluk oranı daha az, su ihtiyacı daha az, işlenebilirlik daha fazla Kırma taş; boşluk oranı daha fazla, su ihtiyacı daha fazla, işlenebilirlik daha az. Mukavemet; hemen hemen aynı
Alkali-Agrega Reaksiyonu	Hacim Stabilitesi	Olmamalı
Alkali-Karbonat Reaksiyonu	Durabilite, Aderans	Olmamalı
Granülometri	Mukavemet Durabilite Ekonomi İşlenebilirlik Segregasyon	İşlenebilirliği sağlayacak kadar yoğun gradasyon, segregasyonu önleyecek kadar d_{max} , mukavemeti artıracak kadar büyük d_{max} , durabiliteyi artırmak için düşük boşluk oranı, ekonomi için minimum dozaj, optimum w/c oranı, mukavemeti artırmak için maksimum yoğunluk gerekir.

- **Özgöl Ağırlık ve Birim Ağırlık:** Agregaların özgöl ağırlığı sahip olduğu minerallere bağlı iken birim ağırlık değeri daha ziyade dane şekline bağlıdır. Normal beton agregalarının özgöl ağırlığı 2,50 ile 2,80 genellikle 2,60 ile 2,70 arasında değişir.

Agregalar su ile dolabilen ve dolamayan boşluklar ile boşluksuz (katı) hacimlere sahip olduğundan dolayı zahiri, hacim ve doygun-kuru yüzey olmak üzere üç farklı özgöl ağırlık değerine sahiptir. Ancak miks-dizayn (karışım hesapları) için betonlarda doygun-kuru yüzey özgöl ağırlık kullanılır.

Doygun-kuru yüzey özgöl ağırlık, agregada danelerinin beton karma suyu ile doygun hale geldiği ağırlığı ifade ettiğinden beton içindeki boşluksuz (mutlak) hacminin tayininde kullanılır.

Birim ağırlık, kuru agregada ağırlığının boşluklu hacmine oranı yani yoğunluğudur. Özgöl ağırlık ve birim ağırlık ne kadar fazla olursa beton mukavemeti de o denli yüksek olmaktadır. Ayrıca birim ağırlık fazlaştıkça boşluk oranı fazlaştığından ince kum ve çimento hamuru ihtiyacı da azalacaktır. Bunlara ilaveten beton agregalarının bir kompasite (C) değeri vardır. Agreganın kompasitesi ne kadar düşük olursa;

- Betonun mukavemeti azalır
 - Boşluk miktarı artacağından çimento ihtiyacı artar
 - Permabilite artar
 - Betonun durabilitesi azalır
- **Absorbsiyon, Porözite ve Rutubet:** Absorbsiyon agreganın suyu emme kabiliyeti iken porözite ise agregada danelerinin suyu emebilecek boşluk miktarıdır. Dolayısıyla agreganın absorbsiyon porözitesinin de bir göstergesidir.

Porözitenin küçük olması agregada danelerinin yüksek mukavemetli olmasını gösterir. Bu da beton mukavemetinin artmasına neden olacaktır. Fakat agreganın porözluğu, agregada-çimento aderansını artırmaktadır. Yüksek mukavemetli betonların mukavemeti, çimento hamurunun mukavemetinin yanı sıra agregada mukavemetinin de yüksek olmasını gerektirdiğinden dolayı porözitenin %5'ten fazla olmaması önerilmektedir.

Agreganın porözitesi ile absorbe edilen su beton karma suyunu azaltacağından betonun işlenebilirliği de azalacaktır. Beton karma suyu agrega tarafından absorbe edilecek su miktarı kadar artırılmalı ve eğer agrega rutubet (serbest su) ihtiva ediyorsa bu miktar kadar da azaltılmalıdır.

Agreganın bu özellikleri arasında en önemli porözitedir. Zira porözite, agreganın mukavemeti için bir gösterge olduğu gibi donma-çözülme ve ıslanma-kuruma direnci için de önemlidir. Agreganın porözitesi ne kadar az ise durabilitesi de o kadar fazla olacaktır. Fakat absorpsiyonun bir miktar fazla olması halinde çimento hamuru ile agregan aderansı artacağından betonun da mukavemeti artacaktır.

- **Dane Şekli ve Yüzey Pürüzlülüğü:** Yüksek çekme ve basınç mukavemeti gerektiren betonlarda kırmataş agrega kullanılmalıdır. Yani rijit kaplamalarda (özellikle hava alanı) kullanılacak beton agregaları mutlaka kırmataş olmalıdır. Agregaların yuvarlak ve pürüzsüz yüzeyli olması halinde işlenebilirlik artmakta ve sıkışma direnci ile içsel sürtünme açısının az olması nedeni ile daha kolay sıkışarak boşluk miktarı azalmaktadır. Halbuki kırmataş agrega yuvarlak olmadığından dolayı köşeli ve pürüzlü bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, daneler arasında kilitleme ve boşluk miktarında artış olur.

Agrega danelerinin pürüzlülüğü arttıkça işlenebilirlik özelliği azalacağından daha çok karma suyuna ihtiyaç gösterecektir. Agregada yuvarlak danelerin yüzdesi arttıkça boşluk oranı da önemli ölçüde azalmaktadır. Kumun toplam yüzey alanı çakıllara nazaran çok daha fazla olduğundan beton karma suyu ihtiyacı artacaktır. Bu nedenle, uygun bir gradasyona sahip olmak kaydı ile kum miktarı az olan agregalar daha uygundur. Kırmataş kumdan yapılan beton kaplamaların yüzeyi ne kadar iyi perdah yapılırsa yapılsın dere malzemesi kuma nazaran daha pürüzlü olmaktadır. Bu da taşıtlar için yüksek sürtünme yaratacağından sürüş emniyeti açısından avantaj yaratmaktadır.

- **Agregaların Su İhtiyacı:** Beton karma suyu ihtiyacı, çimentonun hidratasyonu için yaklaşık çimento ağırlığının %24'ü kadar ve agrega danelerinin ıslanması için yaklaşık agrega ağırlığının %3-5'i kadar ve porözite ile buharlaşma için gerekli bir miktar suyun toplamına eşit olacaktır.

Agregaların su ihtiyacı;

- Agreganın porözitesi

- Agreganın dane şekli ve yüzey yapısı
- Maksimum dane çapı
- Boşluk oranı vb.

özelliklere göre değişim gösterir.

Kırmataş agregalar, yuvarlak ve cilalı yüzeyli dere malzemesi agregalara nazaran daha fazla boşluk oranı, daha fazla yüzey alanı ve daha fazla poröz olduklarından dolayı daha fazla ıslatma suyu gerekecektir.

Islatma suyunun bir kısmı çimento ile reaksiyona girmekte ama büyük bir kısmı da beton sertleştikten sonra buharlaşıp kaybolduğundan dolayı beton içinde boşluk bırakmaktadır. Bu nedenle, ıslatma suyu mümkün olduğu kadar az işlenebilirliği sağlayacak kadar da fazla olmalıdır.

- **Çimento Hamuru-Agrega Aderansı:** Çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans kuvveti, özellikle çekme ve eğilme mukavemeti için önemlidir. Agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü ve porözluğu arttıkça ve mineralojik homojenliği azaldıkça aderans artmaktadır.
- **Durabilite (Dayanıklılık-Aşınma Direnci):** Agregaların durabilitesi beton kaplamanın kalitesi hakkında önemli bir göstergedir. Özellikle yol ve hava alan beton kaplamaları, ağır yüklere maruz otoparklar, yükleme-boşaltma sahalarındaki kaplamalar, vb. yerlerde yapılacak betonlar için kullanılan agregaların aşınma direnci de yüksek olmalıdır. Ayrıcı aşınma direnci yüksek olan agregaların basınç mukavemetleri de yüksektir.
- **Don Dayanıklılığı (veya Direnci):** Agregaların don dayanıklılığı;
 - Porözite,
 - Absorbsiyon,
 - Permabilite

özelliklerine bağlıdır. Agregada danelerinin bünyesindeki boşluklarına nüfus eden suyun donma-çözülme periyotlarında yaratacağı ilave gerilmeler agreganın yorulma mukavemetini aşarak parçalanmasına neden olacaktır. Zira agregada daneleri içindeki boşluklarda bulunan su donma sonunda genişerek agregada üzerinde ilave gerilmeler

yaratmaktadır. Özellikle beton kaplamalarında donma-çözülme periyotlarında kaplamanın altında başlayan çatlaklar zamanla yüzeye çıkmaktadırlar.

Çevre Etkilerine Dayanıklılık: Agregaların donma-çözülme periyotlarındaki hacim genleşmelerine ilaveten,

- ısı değişimleri
- ıslanma-kuruma
- buz çözücü maddeler gibi

olumsuz etkilere de karşı dayanıklı olması gerekir. Aksi takdirde betonda küçük tip kusurlardan (oyulma, soyulma, çatlaklar, yüzeysel aşınma, vb.) tehlikeli parçalanmalara kadar büyük hasarlar meydana gelebilir.

Bünyesinde kir ve sülfat mineralleri içeren agregalar çevre etkilerine dayanıklı değildir. Agregada daneleri içindeki boşlukların boyutu ne kadar küçükse o kadar fazladır.

- **Zararlı Maddeler:** Beton agregalarında bulunacak yabancı madde miktarı, Tablo 5.4'te belirtilen değerden fazla olmamalıdır.

Tablo 5.3'te verilen yabancı maddeler aderansın azalması, priz süresine olumsuz etkisi, çimento ile zararlı kimyasal reaksiyonlara yol açması, mukavemeti düşürmesi, vb. nedenlerden ötürü zararlıdır.

Tablo 5.3: Beton Agregasında Maksimum Yabancı Madde Miktarı (TS 706) [1]

Yabancı Madde	Ağırlıkça Maksimum Miktar, %	
	İNCE AGREGA	KABA AGREGA
Kil Topakları	1,00	0,25
Yumuşak Daneler	-	5,0
Kömür ve Linyit	1,00	1,00
No.200'den geçen kısım	-	1,00 (2)
a. Aşınmaya Maruz Betonda	4,00 (1)	-
b. Tüm Betonlarda	5,00 (1)	-

Not: 1. No.200'den geçen kısım taş tozu (mineral) ise %2 artırılabilir.

2. No.200'den geçen kısım taş tozu (mineral) ise %0,5 artırılabilir.

Agregaların Termal Özellikleri: Beton içindeki agreganın miktarına ve ısı genleşme katsayısına bağlı olarak agreganın ısı ile genleşmesi sonucu betonda da genleşme olacaktır. Ancak agreganın ısı ile genleşmesindeki esas problem, kaba agreganın ısı

genleşme katsayısı ile çimento hamurunun ısı genleşme katsayısının birbirlerinden çok farklı oluşudur. Büyük ısı değişimleri sırasında genleşme katsayılarının birbirlerinden çok farklı olması nedeni ile farklı genleşmelerden ötürü agrega ile çimento hamuru koparak ayrılabilir. Aynı şekilde soğuk havalarda agrega ile çimento hamuru farklı büzülme gösterdiğinden benzer problem doğmaktadır. Eğer agrega ve çimento hamurunun ısı genleşme katsayıları arasındaki fark, $5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ den fazla ise donma-çözülme periyotlarında beton önemli ölçüde etkilenmektedir.

- **Granülometri (Dane Dağılımı, Gradasyon, Derecelenme):** Granülometri granüler danelerin boyut dağılımını ifade eder. Diğer bir deyişle dane çaplarının dağılım eğrisi yani granülometrisi agrega içindeki farklı dane boyutlarının hangi oranlarda olması gerektiğini ortaya koyar. Eğer agreganın granülometrisi şartname sınırları içindeyse mukavemetli, dayanıklı ve ekonomik bir beton elde edilir. Çünkü ideal agrega granülometrisine bir beton karışımında;

- optimum w/c oranında yeterli işlenebilirlik
- çimento dozajında azalma
- mukavemet ve durabilitede artış

sağlanabilmektedir.

Belirli bir w/c oranında hazırlanan bir betonun mukavemeti agreganın granülometrisinden bağımsızdır. Ancak granülometrinin;

- işlenebilirlik
- ekonomi
- segregasyon (ayrışma)

üzerindeki etkisi büyüktür. Gerekli granülometri için;

- agreganın toplam yüzey alanı
- agreganın toplam hacmi veya daneler arasındaki boşluk

esas alınmalıdır. Çünkü toplam yüzey alanı agreganın ıslatma suyu ihtiyacını belirlerken agreganın toplam hacmi ise işlenebilirlik özelliğini belirlemektedir.

Agreganın maksimum dane boyutu, çimento hamuru miktarı, w/c oranı ve döküm yüksekliği betonun segregasyonunu etkiler. Gerekli çimento hamuru ekonomiyi

etkilerken w/c oranı ise mukavemet üzerinde etkin bir rol oynar. Betondaki boşluk (hava) miktarı ise durabiliteyi etkiler. Dolayısıyla ideal bir beton için üç temel şart (mukavemet, durabilite, ekonomi) ve ayrıca taze beton için iki temel şart (işlenebilirlik, segregasyon) üzerinde granülometrinin önemli etkisi açıkça görülmektedir.

5.3 Çelik Donatılar

Klasik betonarmede, eğilme momentleri nedeniyle yapı elemanı üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin beton yerine donatı ile karşılanması öngörülür. Betonun kusur olarak kaydedilebilecek olan özelliği, çekme gerilmeleri altında direncinin basınç gerilmeleri altındaki direncinden çok küçük olmasıdır. Basit çekme altında betonun direnci, basit basınç altındaki direncinin 1/10-1/12'si düzeyindedir. Kırılma birim boy değişimleri de basınç altında 0,002 ve basit çekme durumunda yine bunun 1/10'u kadar yani 0,0002 mertebesinde. Betonun bu sakıncalı davranışı, taşıyıcı bir yapı elemanının kesitinde meydana gelen çekme gerilmelerini alacak şekilde taşıyıcı sisteminin çekme bölgelerini çelik çubuklarla donatmak suretiyle giderilmiş ve betonarme olarak tanımlanan cisim oluşturulmuştur. Beton ile çeliğin aralarındaki aderans nedeni ile beraber çalıştığı bu karma cisimde, çekme gerilmelerinin tamamı donatı tarafından, basınç gerilmelerinin tümü veya önemli bir kısmı beton tarafından alınmaktadır. Bu genel ilkenin yanı sıra, yol betonlarında kullanılan diğer önemli bir işlevi de betonun rötresinden kaynaklanan şekil değiştirmelerin ve kılcal çatlakların, beton ve donatı arasındaki aderans yardımı ile uniform olarak dağıtılmasıdır. Bu durumda yüksek aderans sağlayan donatı tipleri seçilmelidir.

Beton yol inşaatında diğer bir donatı kullanma alanı da derzlerin kuvvetlendirilmesidir. Beton plakların kesikliğe uğradığı yerlerde düşey yük transferinin sağlanması için kayma demirleri kullanılır. Bu demirlerin çapları plağın kalınlığına bağlı olarak 20 mm'den fazla seçilir. Boyları genellikle 80-100 cm'dir. Demirin yüzeyi kaymayı sağlamak için nervürlü olmalıdır. Sertleşmiş betonun içinde plağın genleşmeden kaynaklanan şekil değiştirmesine engel olmamak için gres yağı, plastik veya bitümlü bir film tabakası ile kaplanmış olurlar. Derzlerin veya çatlakların zamanla açılıp genişlemelerini önlemek amacı ile kullanılan bağlantı demirleri yüksek aderanslı donatı tipinden olup genellikle 12 mm çaplı ve 60-80 cm uzunluğunda tasarlanırlar. Sürekli betonarme yol tekniğinde kullanılan plak

donatıları da yüksek aderanslı türden seçilirler. Kullanılan demir çapları 12 mm-16 mm'dir. Firkete boyları genellikle 12 m-18 m'dir. Beton yol tekniğinde kullanılan diğer bir donatı türü de kaynak ile çubukları bağlanmış prefabrike hazır demirlerdir.

Tablo 5.4: Beton Çelik Çubukları ve Çelik Hasırları Sınıflandırma ve Özellikler [1]

Ürün	Beton çelik Çubukları				Beton Çelik Hasırları			
Tipleri	Düz	Nervürlü-Profilli			Düz	Profilli	Nervürlü	
Simgeleri	BÇIa	BÇIIa	BÇIIIb		BÇIV	BÇIV	BÇIV	BÇIV
Anma Çapı ϕ (mm)	5-28	5-28	5-12	14-28	4-12	4-12	4-12	6-16
Minimum Akma Sınırı kgf/cm ² (N/mm ²)	2200 (220)	4200 (420)	4200 (420)	4200 (420)	5000 (500)	5000 (500)	5500 (550)	5000 (500)
Maksimum Akma Sınırı kgf/cm ² (N/mm ²)	3200 (320)	5700 (570)	-	-	-	-	-	-
Minimum Çekme Direnci kgf/cm ² (N/mm ²)	3400 (340)	5000 (500)	5000 (500)	5000 (500)	5500 (550)	5500 (550)	5500 (550)	5500 (550)
Minimum Birim Kopma Uzaması (%)	18	12	10	10	5-8	5-8	5-8	8

5.4 Karma Suyu

İçilebilir nitelikteki her su, beton karma suyu olarak kullanılabilir. Ancak karma suyu için aşağıdaki hususlar göz önünde tutulmalıdır;

- Asidik özellikte olmamalıdır. Yani $Ph \geq 7$ olmalıdır.
- % 0,04'den fazla SO_3 ihtiva etmemelidir.
- Madeni tuzlar ihtiva etmemelidir.
- Sodyum karbonat çabuk prize ve bikarbonat (HCO_3) ya prizi hızlandırma yada prizi yavaşlatmaya neden olduklarından dolayı kullanılmamalıdır.
- %2'den fazla yağ içeren sular beton mukavemetini %20'den fazla azalttığından test edilmeden kullanılmamalıdır.
- Deniz suyu yukarıdaki şartları sağlıyorsa ve içme suyu ile yapılan betona göre %90'dan fazla mukavemet veriyorsa kullanılabilir.
- Korozyona neden olduğundan dolayı sodyum klorit ihtive etmemelidir.
- Betonun bozulmasına neden olan sodyum sülfat (SO_4) ve alkali oksitler maksimum %1 olmalıdır.
- Kil, silt, organik madde vb. maksimum %0,2 olmalıdır
- Şeker ve şekerli maddeler ihtiva etmemelidir.

5.5 Katkı Maddeleri

Beton katkı maddesi beton karışımı sırasında farklı amaçlar için uygun miktarlarda katılan kimyasal maddelerdir.

Beton katkı maddeleri;

- Taze beton için:
 - Su miktarını artırmadan işlenebilirliği artırmak
 - İşlenebilirliği azaltmadan su miktarını azaltmak
 - İşlenebilirliğin süreye bağlı kaybını azaltmak
 - Segregasyonu önlemek
 - Terlemeyi önlemek ve/veya azaltmak
 - Pompalamayı kolaylaştırmak
- Sertleşmiş beton için:
 - Mukavemeti artırmak
 - Hidratasyon ısını azaltmak
 - İlk günlerdeki mukavemet artışını hızlandırmak
 - Durabiliteyi artırmak (geçirgenliği azaltmak, tuz-çözücü maddelerin ve zararlı kimyasalların zararlı etkilerini azaltmak, don direnci artırmak, vb.)
 - Genleşmeleri kontrol altına almak
 - Donatıların korozyonunu önlemek
 - Aderansı artırmak
 - Mekanik özelliklerini iyileştirmek (aşınma, çarpma tesirleri, büzülme)
 - Ekonomi sağlamak

gibi amaçları vardır.

5.6 Beton Koruma (Kür) Maddeleri

Gerçekleştirilen deney ve gözlemlerden, sertleşme sırasında betonun çok çabuk kurumaktan korunması gerektiği sonucuna varılmıştır. Betonun priz aşamasında korunmuş olması aşınma ve eğilme direnç değerlerini artırmaktadır. İlk üç gün ıslak tutulan betonun kırılma modülü %20, aşınma direnci %35 oranında artırılmış olur. Islak tutma süresi 7 güne çıkarıldığında anılan değerler sırası ile %30 ve %40 mertebesine ulaşırlar. Karşıt olarak ilk 72 saat süresince betonun kurumuş olması direnç değerlerini çok düşürmektedir. O halde dikkat edilecek husus, betonun hidratasyon suyunun ortamdaki kaybolmasına engel olunmasıdır. Yüzey perdelama işlemi tamamlandıktan sonra en iyi beton koruma yöntemleri şunlardır:

- Yüzeyin, devamlı ıslak tutulan branda bezi ile örtülmesi
- Yüzeyin, üzerinde su tabakası oluşturacak şekilde sürekli sulanması,
- Havanın nemini tutucu nitelikteki tuzların (en çok kullanılanı kalsiyum klorürün) karma suyuna katılması veya yüzey işlemlerinin bitmesinden sonra serpilmesi,
- Bitmiş yüzeye sodyum silikat, ham kauçuk, katbek asfaltlar veya su geçirmez kraft kağıdı döşenmesi.

Islak saman, ot veya toprak gibi koruyucular da denenmiştir. Ancak bu tür koruyucular kuruyunca rüzgar etkisiyle çevreyi kirletici etken olmaktadır. Suyun bol bulunduğu yörelerde ve platform eğiminin fazla olmadığı kesimlerde en iyi koruma yüzeyde su tabakası oluşturulmasıdır. Nemli iklimlerde 24 saatlik (kısa süreli) su korunmasından sonra kalsiyum klorürlü koruma uygulanabilir. Bu tuz karışımına katılacak ise, 1 torba çimentoya 1 kg kalsiyum klorür eklenmelidir. Bu koruyucunun daha sonra yüzeye serpilmesi yöntemi tercih edilmiş ise metrekaresine 1-1,5 kg pul malzeme serilir. Havası çok kuru bölgelerde bu yöntem kullanılamaz. Sodyum silikatın (su camı) eriyik halinde beton yüzeyine sürülerek buharlaşmayı kısıtlayıcı bir rol üstlenmesi istenir. Metrekareye 500 gr kadar koruyucu kullanılmaktadır. Katbek asfaltlar veya su geçirmez kraft kağıdı da buharlaşmayı azaltıcı etkenlerdir. Yüzeye püskürtülen katbek asfaltlar koyu renkli olduklarından güneşli havalar da tercih edilmezler. Dokusu fiberle pekiştirilmiş parafinli kağıt örtüler yüzey tesviye

işlemleri biter bitmez uygulanır ve koruma süresi sonuna kadar, zaman zaman ıslatılarak yerinde bırakılır.

5.7 Derz Dolgu Malzemeleri

Beton plaklarda değişik nedenlerden dolayı bırakılan derzler, kaplamanın kritik bölgelerini oluşturur. En azından ortamda süreksizlik oluşturdukları için bunların dolgu maddeleri ile doldurulup tıkanmaları gerekir. Bu malzemelerin plak hareketlerine uygun davranmaları gerekeceğinden, betonun genleşme ve büzülmesine olanak sağlamalı, tabanın yumuşamasına, betonun yerinden oynamasına ve don kabarmasına yol açacak suların sızmasına engel olmalı, derzlere taş parçalarının girmesine mani olmalı, düzgün bir yüzey sağlamalıdır. Beton plakta tüm tabaka derinliğince oluşturulan derz boşluğunun alt ve üst kısımları farklı dolgu maddeleriyle doldurulur.

I. Alt Dolgu Malzemeleri: Bunlar derz imali için önceden hazırlanmış sıkışabilen malzemeden istenilen kalınlık ve derinlikte yapıp genleşme derzlerinde beton dökülürken yerleştirilirler. Üst dolgu maddelerine destek görevi de yüklenen bu maddeler yumuşak tahtadan, su geçirmez preslenmiş plaklar, mantar veya gözenekli lastikten imal edilirler. Alt dolgu malzemelerinin elastik olmaları, taze betonun suyunu almamaları, su etkisiyle bozulmamaları gerekir.

II. Üst Dolgu Malzemeleri: Derz örtme malzemesi olarak, toz, toprak ve suyun derze girmesini önleyici görev yaparlar. Aranan başlıca özellikleri, betona iyi yapışmaları, çatlamadan uzayabilmeleri, sıcak havada akmaya karşı direnç sağlamaları, toz ve toprağın girmesine karşı direnç oluşturmaları, dayanıklı ve uzun ömürlü olmalarıdır. Bu malzemelerin çoğu ısıtılarak erimiş halde derze dökülür. Derz üst dolgu malzemeleri kış ve yaz aylarında kıvam özelliklerini fazla değiştirmemelidirler. Lastik-bitüm karışımları, oksitlenmiş bitüm bileşikler, damıtma ürünleri olan bitüm bileşikler, reçineli bileşikler, örtme karışımlarının, beton yol derzlerinde yaygın olarak kullanılan ve iyi sonuç veren türlerindendir.

6. RİJİT ÜSTYAPI TİPLERİ

Beton yollar; çimento betonu ile yapılan ve üzerinden geçen dingil yüklerini tabana ileten bir kaplama türü olup, üstyapı tabanı üzerine yerleştirilen alttemel tabakası, zayıf beton tabakası veya bitümlü tabaka üzerine serilmiş beton plaktan oluşmaktadır.

Rijit üstyapılar üç farklı şekilde inşa edilebilmektedir:

- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar
- Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar
- Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar

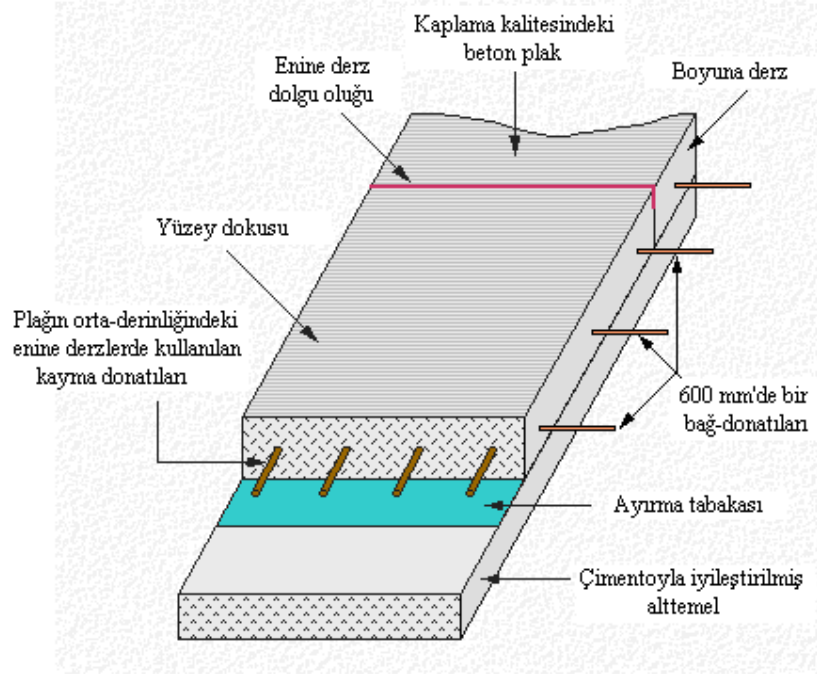
6.1 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, 3-6 m. uzunluğunda kısa anolardan oluşur. Bloklar 125-350 mm. kalınlığında olup donatı çeliği içermezler. Derzler zayıflatılmış yüzey kasılan tipte olup geçmeli veya geçmesiz olabilirler. Anolar genel olarak granüler malzeme, çimento veya bitümlü tabakalar üzerine inşa edilir.

Zayıf beton ve sıkıştırılmış kaba agregadan inşa edilen temeller, halen bazı eyaletlerde kullanılmaktadır. Temel tabakası kalınlıkları 100-200 mm. olabilir.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kısa derz aralığı, ano ortası çatlamayı asgariye indirmek ve derz açıklıklarını nispeten küçük tutmak için kullanılır. Aynı sebepten dolayı bağlanmış boyuna derzler de buna dahildir. Derzlerde bağlantı yükü transferinde, malzeme kenetlenmesinden yararlanır. Ağır trafik taşıyan yollarda, özellikle nemli bölgelerde, yük transferini geliştirmek için beton demirleri veya daha ziyade stabilize temel tabakası kullanılır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar genellikle, Amerika Birleşik Devletlerin tüm iklim alanlarında, hava alanı döşemelerinde, otoyollarda ve şehir içi caddelerde kullanılır. [18]

Gerek derzli donatısız tipteki gerekse derzli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, plak ile alttemel arasındaki sürtünmenin azaltılarak orta açıklıktaki çatlamların engellenebilmesi için bir ayırma membranına ihtiyaç duyulur. (Şekil 6.1)



Şekil 6.1: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar [18]

6.2 Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar

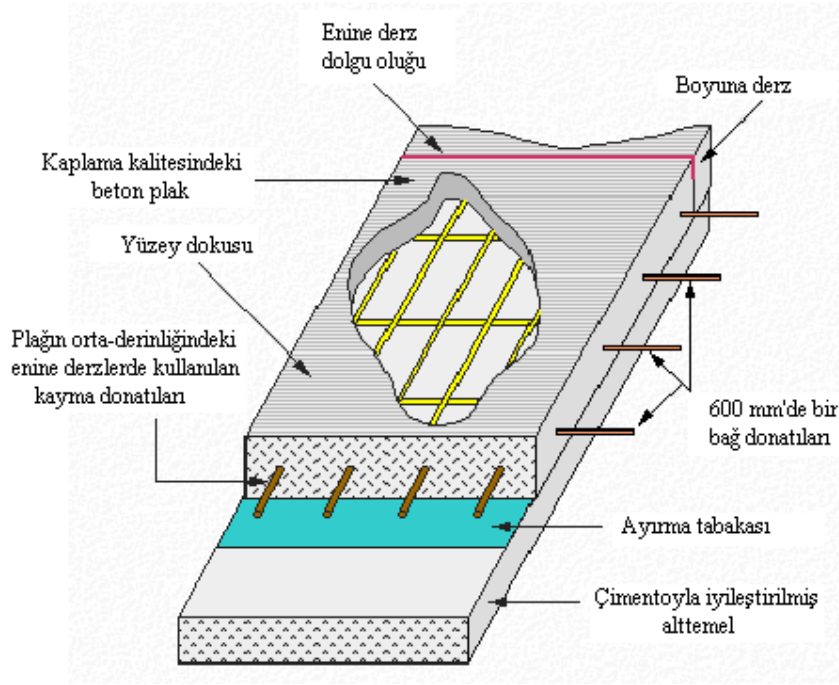
Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, uzunlukları 8-30 mt.lik anolardan oluşur. Blok kalınlıkları 150-350 mm. olup, ortalarında donatı çelik ağı geçmektedir. Temel tabakası kalınlığı 100-200 mm. dir.

Daha uzun derz aralığı verildiğinde kurumadan dolayı büzölmeye ve ısıdan dolayı kıvrılmaya bağılı olarak bu tür kaplamada çatlaklar oluşur. Donatı çeliğı kullanılması amacı da bu ano ortası çatlaklarının oluşmasını engellenmesidir. Çatlakları sıkı tutarak, yük transferinin sağlanması çelik tarafından yapılır. Burada çelik, beton bloğun esneklik kapasitesini artırmak için kullanılmamaktadır.

Daha uzun derz aralığı kullanılması ayrıca daha büyük derz açıklıklarına neden olur. Dolayısı ile derzler arası yük transferini sağlamak için donatı çubukları kullanılır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, donma ısısındaki bölgelerde ve nemli bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar, enine derz aralıklarının artırılmasına olanak tanıyan donatılar dışında derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar ile benzerdir.

Gerek derzli donatısız tipteki gerekse derzli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, plak ile alttemel arasındaki sürtünmenin azaltılarak orta açıklıktaki çatlamların engellenebilmesi için bir ayırma membranına ihtiyaç duyulur.



Şekil 6.2: Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar [18]

6.3 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar

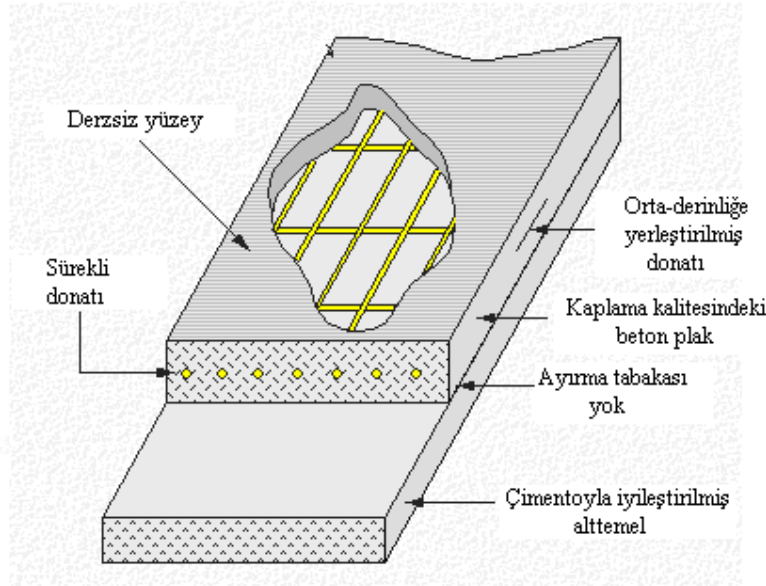
Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, enine derzler olmaksızın döşenen beton bir plaktan oluşur. Yüksek donatı içeriği buna olanak tanır ancak diğer tüm betonarme yapılarda olduğu gibi, donatılar çatlakları önlemez sadece kontrol altında tutar. Çelik donatı plak boyunca sürekli olarak vardır ve derzler yalnızca hergün iş bitiminde konulur. Plak kalınlıkları 150-250 mm. olur. Bu tür kaplamalarda derzli donatılı tipteki rijit üstyapılardan oldukça fazla çelik vardır. Genel olarak kesit alanının %5-%7'i kadardır.

Uzun derz aralıklarının bir sonucu olarak, bu tür kaplamalarda kaplama ömrünün ilk birkaç yılı boyunca 0.6-2.4 mt. lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar plak içindeki donatı çeliği sağlam olduğu sürece sıkıca kapalı kalırlar. Eğer çelik yüksek

çekme gerilmelerine karşı koyamayacak durumda ise, enine çatlaklar açılarak bozulabilirler. Uzunlamasına çatlaklarla birleşen bozulmuş çatlak bölgeleri, ciddi kaplama bozulmasına işaret eden, yüzeysel oyulmalara (zımbalama etkisi) yol açabilir. Plak desteğini artırmak ve tekerlek yükleri altındaki ano gerilmelerini azaltmak için bu kaplama ile birlikte genellikle bir stabilize temel kullanılır.

Bu kaplama türünün yaygın olarak kullanılmasına karşılık toplam beton kaplamaya oranı oldukça düşüktür.

Derzli donatısız ve derzli donatılı tipteki rijit üstyapılarda görülen ayırma membranı, beton temel ile alt-temel arasında daha yüksek bir düzeydeki sürtünmenin elde edilebilmesi için sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda çıkarılmıştır. Alt-temel ile sağlanan desteklik üstyapı sonundaki oynamaları azaltmaktadır ve istenilen çatlama modelini korur. Plaktaki süreksizliklerin, kabarıp dökülme riski ile birlikte birbirine yakın aralıklı çatlamalara olanak tanınması nedeniyle, mümkün olan her yerde önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı rögarların ve su yollarının bu tipteki rijit üstyapı plaklarının dışında bulundurulması gerekmektedir.



Şekil 6.3: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar [18]

7. DÜŞÜK VE YÜKSEK TRAFİK HACİMLİ KARAYOLLARINDA RİJİT ÜSTYAPI UYGULAMALARI

Bu bölümde düşük ve yüksek trafik hacminin taşındığı karayollarında tercih edilen rijit üstyapı uygulamaları, bu uygulamalarda kullanılan malzemeler ve gerekli olan tasarım verilerine bir bakış sunulmuştur.

7.1 Düşük Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapı Kullanımı

Düşük trafik hacimli karayolları, her ülkede yer karayolu ulaşım sisteminin bağlayıcı dokularını oluştururlar. Aynı zamanda bunların, bölgeler arası ulaşımın sağlanmasında, insani ve sosyal ilişkilerin elde edilmesinde ve ulusal ekonomilerin büyük bölümünün üzerine kurulu olduğu çevresel üretim ve ünite pazarları arasındaki bağlantının garanti edilmesi gibi yeri doldurulamaz fonksiyonları vardır. Örneğin; bakım işlerindeki bir aksaklığa bağlı olarak bu sistem üzerindeki trafik akışında oluşan bir kesilme günlük haberde çok önemli bir manşet oluşturmaz fakat, küçük yerleşim alanlarının ayrılmasına yol açabilir veya mevsim meyvelerinin toplanmasına engel olabilir. Özet olarak, düşük trafik hacimli yolların üstlendiği fonksiyonların önemi sıkça unutulmaktadır veya herhangi bir sebep yüzünden gereken önem verilmemektedir. [12]

Düşük trafik hacimli yollardaki üst yapılar, asfalt çimentosundan, çakıldan, taşlardan, birbirlerine bağlı beton bloklardan ve çimento betonundan meydana getirilebilir.

Bu bölüm; çimento betonuyla oluşturulan en son tipteki üstyapılarla ilgilidir. İlk beş bölüm düşük trafik hacimli yollar için rijit üst yapıların genel konsepti ile ilişkili iken diğerleri kırsal yollar ve kentsel karayolları için düzenlenmiştir.

7.1.1 Düşük Trafik Hacimli Karayollarının Tanımlanması

Düşük trafik hacmine sahip herhangi bir bölgesel yol, kentsel veya ekstra-kentsel yol, düşük trafik hacimli yol olarak tasarlanabilir. Birçok ülkede düşük trafik hacmi; ortalama günlük trafiğin 900-1000 aracı geçmediği trafik düzeyi anlamına gelir. Her

tipteki yol için trafik çok değişkendir ve yolun bulunduğu kategoriye göre genelleştirilmesi kolay değildir.

7.1.2 Düşük Trafik Hacimli Karayolları İçin Rijit Üstyapılar

Malzemelerin esas karakteristiklerinden dolayı rijit üstyapılar genellikle, sadece yüksek yoğunluktaki trafiğe uygunmuş gibi düşünülmektedir. Fakat bu tür üstyapılar aynı zamanda düşük trafik hacimli yollara özgü olan mekanik dayanım ve durabilite gerekliliklerinin karşılanması için gerekli olan esnekliği de gösterebilmektedirler.

7.1.2.1 Düşük Trafik Hacimli Karayolları İçin Kullanılan Rijit Üstyapı Tipleri

Genellikle kayma donatısı içermeyen donatısız rijit üstyapılar, düşük trafik hacminden orta trafik hacmine sahip altyapı sistemleri için en uygun ve en ekonomik çözümlerdir.

Düşük trafik hacimli yollardaki üstyapılarda uzun süreli performans için özellikle yaya alanları, bisiklet yolları, park alanları, endüstriyel alanlar, tarihi yerleşim merkezlerinde birbirlerine geçmeli rijit bloklar kullanılmaktadır. İkincil yollar için, özellikle kırsal yollarda 80'li yıllardan itibaren silindir ile sıkıştırılmış rijit üstyapı tekniği yaygınlaşmaktadır. Bu yaygınlaşmanın arkasındaki sebep bu tip kullanımın gerekliliklerinin ortaya koyduğu avantajlardır ve bunlardan ilki bu tip uygulamanın herhangi bir özel ekipmana ihtiyaç duymamasıdır; genelde kolaylıkla elde edilebilen silindir, finişer, tesviyelendirici gibi araçlar kullanılabilir. Diğer avantajı ise üstyapının takviye tabakası gerektirdiği yerde yolun sıkıştırma tamamlanır tamamlanmaz yeniden trafiğe açılabilmesidir.

7.1.2.2 Bir Rijit Üstyapının İyi Bir Alternatif Sağladığı Durumlar

Rijit üstyapılar bakım işlerinin azaltılmasının önemli olduğu durumlarda iyi bir alternatiftir. Rijit üstyapılar olağanüstü dayanıma ve durabiliteye sahiptir. Rijit üstyapının aşınma direnci hemen hemen hiç bakıma ihtiyaç duyulmadan ağır taşıtların geçişi altında bile uzun yıllar boyunca kullanımını sağlar. Bu durum düşük trafik hacimli yollar için çok avantajlı olabilmektedir. Aslında bu tür yollar, bir çok durumda; dar enkesit, yüksek boyuna eğim, küçük kurp yarıçapı ve benzeri daha düşük uygunluktaki geometrik karakteristiklere sahiptir ve bu durum çalışma araçlarının hareketinde zorluklar yaratabilmektedir.

Plağın, yükleri zemin üzerine geniş bir yüzeye üniform olarak dağıtabilme kapasitesinin yüksek olması göz önüne alındığında birçok durumda düşük trafik hacimli yollar için rijit plak herhangi bir alt temel tabakasına gerek duyulmadan direkt olarak taban zemini üzerine inşa edilebilmektedir. Bu kayda değer ölçüde yapım kolaylığı ve malzeme tasarrufu anlamına gelir.

7.1.2.3 Tasarım Süreci Sırasında Bir Rijit Üstyapının Kullanımının Karar Zamanı

Bir yol inşa edileceği zaman sorulması gereken ilk soru; hangi malzemenin kullanılmasının daha uygun olacağıdır.

Herhangi bir diğer karara varılmadan önce beton malzemesi kullanılıp kullanılmayacağına karar verilmesi gereklidir. Üstyapı, geniş çerçevede bakıldığı zaman idare tarafından karşılaşılan problemler üzerinde daha az etkiye sahip teknik detayları temsil etmesine rağmen çevre, iklim ve artan trafik sebebiyle oluşan dış koşulların meydana getirdiği sebeplerden dolayı servisteki bir yolun en yüksek etki altındaki elemanıdır.

Yol servise açıldığında ve yolun inşası için kenarda tutulan para tükendiğinde üstyapının teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel fonksiyonları başlar ve bu özelliklerini uzun yıllar boyunca koruması beklenir. Eğer yolun fonksiyonu kısıtlı olarak göz önüne alınırsa bunun sonuçlarının ortaya çıkması gecikmeyecektir. Bu sonuçlar ortaya çıktığında olası problemlerin teknik olarak doğru bir yolla çözümü için gereken finanssal kaynaklar genellikle yetersiz kalmaktadır.

Sonuç olarak; inşa teknolojilerinin güncelleştirilmesiyle, en uygun çözümün elde edilip belirlenmesi amaçlı detaylı tasarım araştırmalarının sonunda üstyapının arz edilmesi gereklidir. [12]

7.1.3 Düşük Trafik Hacimli Karayolları İçin Çimento Betonu Karakteristikleri

Düşük trafik hacimli rijit üstyapı inşaatlarında aranan temel gereklilikler dayanım ve durabilitedir. Betonun tekerlek yükleri ve sıcaklık değişimleri sonucu oluşan çekme gerilmelerine karşı yeterli güçte olması gerekir. Genel olarak düşük trafik hacimli yollardaki betonun 28 günlük eğilme mukavemeti $4-4.5 \text{ N/mm}^2$ 'yi aşmaz. Özgün gereklilikler yolun tipine göre değişim göstermektedir.

Beton, aynı zamanda; donma–çözülme etkilerini ve buzlanmayı önleyici tuzlama uygulamalarını ve bununla birlikte trafik hareketi sebebiyle yol yüzeyinde oluşan aşınmalara karşı yeterli derecede durabil olmalıdır.

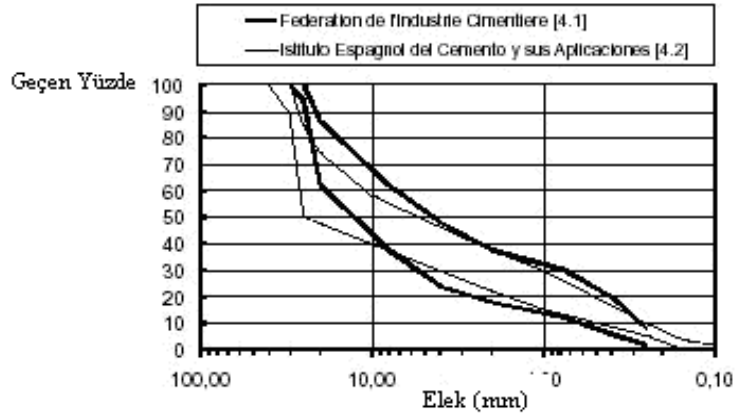
Düşük trafik hacimli yollardaki üstyapılar anayol ağındakine benzer tipteki malzemelerden oluşturulur.

Bir rijit üstyapının başarısı başlıca betonun ve onu oluşturan bileşenlerin kalitesine göre değişim gösterir. Betonun mekanik karakteristikleri ağırlıklı olarak agrega karışımına göre değişim gösterir. Özellikle bu elemanların tipi ve gradasyonu; işlenebilirlik, rötre, permeabilite ve duyarlılık özelliklerine etki etmektedir. Buna ek olarak bir yol üstyapısındaki agregaların sürüş güvenliğinde çok önemli bir rolü vardır. Aşınma tabakasındaki mikro doku ve bunun kayma direnci, buna bağlı olarak değişir.

7.1.3.1 Çimento Betonunda Kullanılan Agregalar

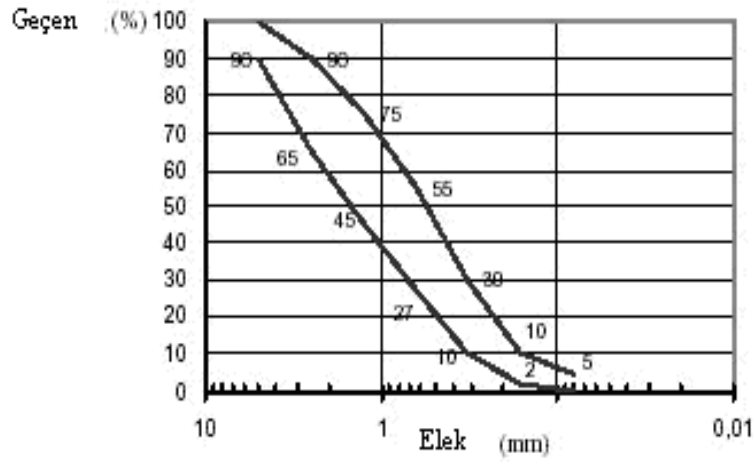
Agregalar, doğal veya kırma taş olabilirler ve gradasyonlarına göre nitelendirilirler. Rijit üstyapılar için birçok ülkede gradasyon eğrileri belirlenmiştir ve bunlar birbirinden çok fazla farklılık göstermezler. Hepsindeki talep taze betonda gerekli işlenebilirlik ve istenen mekanik dayanım ile sıkışmayı sağlayabilecek sürekli bir agrega gradasyon eğrisidir. Beton karışımında segregasyonun önüne geçilebilmesi için vibratörlenmiş betonlardaki maksimum agrega boyutu genellikle 35–40 mm arasında iken silindir ile sıkıştırılmış olanlarında 16–20 mm arasındadır. Her ne olursa olsun agreganın boyutu dökülecek beton tabakasının kalınlığının yarısını geçmemelidir.

Şekil 7.1’de bazı tasarım kılavuzlarında düşük trafik hacimli üstyapılar için belirlenen iki gradasyon eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Bazı Avrupa ülkelerine ait tasarım kılavuzlarındaki gradasyon eğrileri [12]

Şekil 7.2'de İspanya'daki Castilla-Leon bölgesinde; düşük trafik hacimli yollardaki gereksinim duyulan ince taneli agregalara ait gradasyon eğrileri görülmektedir.



Şekil 7.2: İspanya'daki Castilla-Leon bölgesinde; düşük trafik hacimli yollardaki gereksinim duyulan ince taneli agregalara ait gradasyon eğrileri [12]

- **Kullanılmış Agregaların Beton Karışımlarında Yeniden Kullanılabilmesi**

Geçmiş birkaç yıl üzerinde bir çok ülkede bina ve yolların yıkımından elde edilen kullanılmış malzemelerin yeniden kullanımı göz önünde tutulmuştur.

Teknik karakteristikler bakımından, yıkımlardan ve geri dönüşümden elde edilen malzemeler, dolguların temellerin ve alt temellerin oluşturulmasında güvenilirliklerini kanıtlamışlardır.

7.1.3.2 Çimento

Düşük trafik hacimli beton yol üstyapıları için genellikle orta dayanımlı portland çimentosu kullanılır.

- **Çimento/Su Oranı**

Düşük trafik hacimli yollardaki su/çimento oranı genellikle 0.55'ten düşük tutulur ve akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılırsa bu oran daha da düşüktür. Silindirle sıkıştırılmış betonlar için ise su/çimento oranı daha kuru bir karışım elde edebilmek için 0.37 ile 0.42 arasında değişmektedir.

7.1.3.3 Betonda Katılmış Havanın Önemi

Betona hava katarak hava boşluğunun oluşturulması, don etkilerine ve buzlanmayı önleyici tuzların etkisine karşı ek durabilite sağlanabilmesi için gereklidir. Aksi takdirde yüzeyde kabarma ve dökülmeler oluşur. Karışıma havanın dahil edilmesinden kaynaklanan dayanımdaki azalmayı karşılamak için gerekenler karışım dizayn prosedürlerine göre yerine getirilmelidir.

Dahil olan hava vibratörlenmiş beton için hacimce %4'ü geçmemelidir ve silindirle sıkıştırılmış betonlar için bu değer %5 ile %10 arasında değişebilir.

7.1.4 Gürültü Probleminin Rijit Üstyapı Kullanımı İle Azaltılabilmesi

Avrupa'daki birçok ülkede poröz beton kullanımı ile düşük gürültü karakteristiğine sahip beton yüzeyler elde edilebilmiştir. Bu tip beton; iyi kayma direnci, düzenlilik ve gürültü soğurma özelliklerini birlikte gösterirken göze çarpan özellikleri süreksiz gradasyon eğrisi ve yüksek porözite derecesidir (%20-25). Poröz beton, yüksek gürültü soğurabilmenin yanında aynı zamanda mükemmel drenaj kalitesine sahiptir. Böylelikle su kızıağı oluşumunda kayda değer azalmalar gözlenir. Poröz beton uygulamaları hem alt temel tabakalarında hem de yüzey tabakasında olmak üzere özellikle Fransa'da oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu olumlu katkıları bakımından poröz beton, eski üstyapılar için bir bağlayıcı takviye tabakası olarak ince tabakalar (50–60 mm) halinde kullanılabileceği gibi daha büyük kalınlıklarda da kullanılabilir.

Beton yüzeylerde gürültüyü azaltan üstyapıların inşası için, diğer bir teknik 1990 yılında Avusturya'da geliştirilmiştir. Bu inşa tekniğinde en üst tabaka; maksimum

dane çapı 8 mm olan agregalardan meydana gelmiştir. Betonun yerleştirilmesinden sonra yüzey bir geciktirici ile spreyleneir ve sonraki gün fırçalanarak agregalar ortaya çıkarılır. Bu teknikle inşa edilen üstyapılarda tekerlek/yol gürültüsü özelliği diğer düşük gürültülü yüzeyler kadar azdır ve kayma direnci geleneksel tekniklerden daha iyidir.

7.1.5 Düşük Trafik Hacimli Karayolları İçin Üstyapı Tasarımı

Bir yol üstyapısının tasarımı; en uygun yapı tipini, bunu oluşturacak tabaka kalınlıklarını ve üstyapının tüm kullanım ömrü boyunca, verilmiş bir olasılık içinde önceden belirlenmiş bazı minimum değerleri geçen fonksiyonellik değerlerini sağlayan malzeme karakteristiklerinin seçimini amaçlar. Tasarım metotları 3 kategori halinde sınıflandırılabilir: rasyonel, ampirik ve kataloglar.

Rasyonel tasarım metotları üstyapının tasarım ömrü boyunca herhangi bir trafik ve çevre koşulu altındaki davranışının modellenmesi olasılığını verir.

Düşük trafik hacimli yol üstyapılarının tasarımı daha çok ekonomik olanaklar bağlamında sınırlıdır ve diğer tasarım özellikleri olan fonksiyonellik, güvenilirlik ve güvenlik gereklilikleri orta ve ağır trafik taşıyan yol üstyapılarına göre daha önemsizdir. Bu bakımdan ampirik metotların ve katalogların, daha esnek ve daha kısa sürede uygulanabilirlikleri nedeni ile, bu tip üstyapıların tasarımı için daha uygun oldukları düşünülmektedir.

Bir rijit üstyapı için tasarım verileri şunlardır: trafik, taban zemini karakteristikleri, iklim, beton dayanımı.

- **Tasarımda Göz Önüne Alınması Gereken Trafik Yüğü ve Düzeyi**

Düşük trafik hacimli yollar için trafik yüklerinin ve taşıt kompozisyonunun tanımlanması her tip yoldaki trafiğin oldukça değişken ve yol kategorisine genelleştirilmemesinden dolayı özel incelemeler gerektirir. Birkaç örnek verilmesi gerekirse:

- Kırsal yollar alanın kullanım işlevine göre farklı konfigürasyona ve ağırlığa sahip tarımsal araçlar tarafında kullanılabilir.
- Yaya ve bisiklet yollarında motorlu araçların sürüşü açık bir biçimde engellenmiştir. Bu tür yollarda servis araçlarına erişimin izin verildiği yerlerin tasarım yapılırken geçiş sayılarının adım adım belirlenmesi gereklidir.

- Endüstriyel alanlardaki sadece düşük trafik hacmini taşımak durumunda olan erişim ve dağıtım yolları, baskın olarak ağır taşıtların trafik kompozisyonunda tuttuğu yere göre tanımlanır. Taşıtların tipi ve frekansı direkt olarak bölgedeki sanayi kuruluşlarının tipine bağlı olarak yapılan üretime bağlıdır.

- **Bir Rijit Üstyapının Tasarımını Etkileyen Taban Zemini Karakteristikleri**

Üstyapı için sürekli uniform bir taban zemini gerekir; çünkü bu tür zeminler:

- Trafik yükleri ve hidrotermal gerilme etkileri altında uygun performans gösterir.
- Yapım işlemleri sırasında alt temel tabakasının etkili ve uniform bir şekilde kompaksiyonuna olanak tanır.
- Plak ve yol düzleminin yüzeyi için daha iyi seviyedeki yüzey düzenliliğini garanti eder.

Üst yapılarının daha düşük hızdaki ve daha düşük hacimdeki trafiği taşıması gerektiği durumlarda daha düşük performans gösteren malzemeler kullanılabilir. Bunlar geleneksel malzemelerle birlikte bölgesel veya geri dönüşümden elde edilen malzemeler olabilir.

Alt temel veya taban zemini materyalinin standartları karşılayamadığı durumlarda çimentoyla, kireçle, bitümle veya yüksek fırın cürufu ile stabilizasyon teknikleri ekonomik olabilir. Şişen zeminler özellikle rijit üst yapılar için çok zararlıdır. Bu bakımdan etkili bir alt drenaj sistemine ve zemin stabilizasyonuna özel bir dikkat gösterilmelidir.

- **İklim Koşullarının Üstyapı Performansına Etkisi**

Üstyapının taşıma kapasitesi; çimento ile bağlanmış tabakalarda meydana gelen termal biçim değiştirmelere ve nem içeriğinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisine nazaran iklim koşullarından daha fazla etkilenmektedir.

- **Üstyapının Termal Modeline Etki Eden İklim Faktörleri**

Üstyapının termal modeli; hava sıcaklığından, güneşin yaydığı radyasyondan ve rüzgardan etkilenir.

Katılarda ısıyın iletiminin genel teorisine ve deneysel sonuçlar üzerine kurulu olan, yapıda ısıyla oluşan değişikliklerin elde edilmesine ilişkin, birçok model bulunmaktadır.

Bir st yapının tasarımında göz önüne alınması gereken diğer bir iklimsel faktör ise don etkisidir. Don etkisi ile oluşan zarar ya zemindeki don kabarmasının ya da düşük sıcaklığın yüzeyi poröz hale getirmesi ile yapıya suyun girmesi sonucu ortaya çıkar. Belirli zeminlerde don süreci ile ilgili olan emme, suyun daha üstteki zemin tabakalarına yönelimine ve burada ayrışmış yata y buz tabakaları ve lenslerinin oluşumuna sebep olarak yukarıya doğru deplasman veya yüzey kabarmalarına neden olur.

Bu etkiler st yapı tasarımında ve yapımında hesaba katılmalıdır. Betona katkı maddeleri katılması ve plağın altında dona karşı dirençli alt temel tabakalarının kullanılması önerilmektedir.

○ **Nem İçeriğine Etki Eden İklım Faktörleri**

Nem içeriğini en fazla etkileyen faktör yağıştır. Nem oranındaki bir değişiklik ve su seviyesindeki bir artış, taban zeminindeki granüler malzemenin taşıma kapasitesinde bir azalma meydana getirebilir.

Yüzeysel suyun st yapıya verdiği zararın azaltılması için, suyun uzaklaştırılmasını sağlayacak bir enine eğime ihtiyaç duyulur. Genellikle enine eğimler %4 ile % 6 arasında alınır. Ayrıca yol yüzeyinin yeraltı su seviyesinden yeteri kadar yüksek olması gerekir. Yüzey altı drenlerin kurulması ve drenaj hendeklerinin düzenli bakımı ile suyla ilgili problemlerin üstesinden gelinebilir. Yüzey altı drenaj; kırma taş veya çakıl ile doldurulmuş drenaj hendeklerinin ve drenaj borularının kullanılmasıyla veya geçirimsizliği çok fazla olan bir alt temel tabakasının kullanımıyla sağlanabilir.

○ **İklım Faktörlerinin Gz nnde Bulundurulması**

Düşük trafik hacimli yollarda ağır yüklerin süper pozisyonunun etkilerinin ve en ağır iklim faktörlerinin st yapı için göz önüne alınması yapının standart ölçülerden büyük olmasına yol açabilir. Aslında, bir taşıtın yoldan geçişi sırasında en yüksek termal gradiyentin ortaya çıkma olasılığı oldukça düşüktür. Örneğin; kırsal yollarda ekin ve diğer materyali taşıyan ticari taşıtlar günün en serin saatlerinde (sabah ve

akşam) geçiş yaparken st yapının pik sıcaklıklara ulaştığı günün merkez saatlerindeki trafik kayda değer değildir, hatta yoktur.

7.1.6 Yerel Kırsal Yollar

Altyapı olarak kullanılan kırsal yollar şunlara erişim için kullanılır;

- Tarımsal alanlara erişimin sağlanmasında,
- Bakım işleri için ağaçlık alanlarda, ağaç kesim ve yangınla mücadele işlerinde (orman yolları),
- Özel evresel değeri olan alanlarda ve kayak, yüzme, balıkçılık, yelkencilik gibi spor aktivitelerle ayrılan alanlara erişimin sağlanmasında (turist yolları).

7.1.6.1 Kırsal Yolların Karakteristikleri

Geometrik olarak kırsal yollar oldukça küçük enkesitlere, yüksek eğim-profil gradyentine ve düşük kurp yarıçapına sahiptir. Sınırlayıcı olan bu yol karakteristiği elemanları, genellikle kırsal yollara ayrılan ekonomik kaynakların her zaman çok kısıtlı olması ve bunun sebep olduğu toprak işlerinin (yarma-dolgu) minimum seviyede tutabilmesi talebinin sonucudur.

7.1.6.2 Kırsal Yolların Tasarım, Yapım Ve Bakım İşleri Açısından Diğer Yollardan Farkı

Kırsal yol st yapıları yukarda sözü edildiği üzere tasarım, yapım ve bakıma bağlı olarak özel nitelikler gösterir. Düşük trafik hacmine sahipken oldukça yüksek dingil yüklerine ve sıklıkla en değişken trafik kompozisyonuna (traktörler, bisikletler, kamyonlar, at arabaları) maruz kalabilmektedirler. Bu bakımdan bu tür yollar için trafik tahminlerinin yapımı her zaman oldukça zordur. Bu tür yolların sınırlı geometrik karakteristikleri; uygulanması kolay, yapımı-bakımı ekonomik olan ve bununla birlikte çok dik eğimli kesimlerde iyi kayma direnci gösteren üstyapıları gerektirir. Boyuna eğimin yüksek olduğu yerlerde (orman yollarında bu % 20'yi açabilir) yolun yoğun yağış altında yumuşamasına ve bundan kaynaklanan derin tekerlek izlerinin oluşumuyla ulaşımın elverişsiz hale gelmesindense gürültülü bir st yapı tercih edilir.



Şekil 7.3: Yerel kırsal yollar [12]

7.1.6.3 Kırsal Yolların İnşası

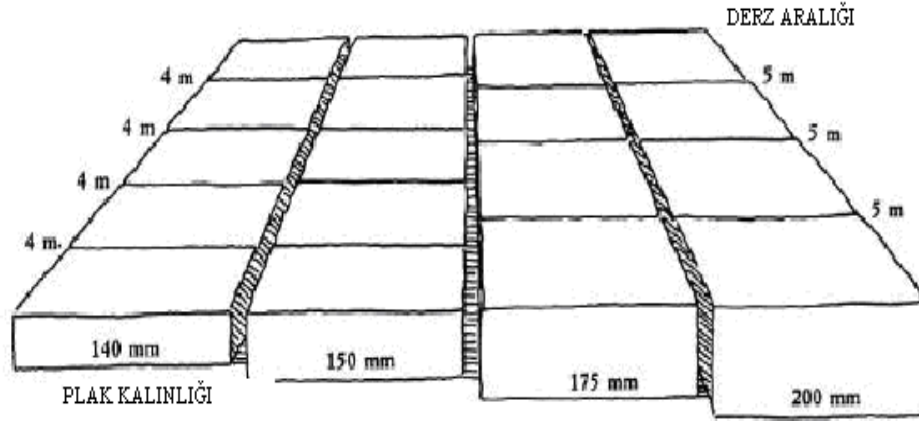
Avrupa'daki bir çok ülkede beton kırsal yolların yapımı oldukça yaygındır. Belçika, Avrupa'daki metrekaresine düşen rijit üstyapı bakımından önde gelmektedir. Avrupa'da yapılan beton kırsal yollardaki kurp yarı çaplarının 10 metreden az olmadığı görülmektedir. Bu betonun kayar kalıp makineleriyle döküldüğü durumlarda 15 m'ye kadar artmaktadır.

Boyuna eğimler her zaman oldukça yüksektir. Kar yağışı alan bölgelerde bu durum %15'le sınırlandırılmıştır.

Plak üzerindeki suyun yanal olarak uzaklaştırılması için enkesit eğimi % 1,5 ile % 2 arasındadır.

Yol enkesitinin genişliği iki aracın geçişini sağlayacak şekilde 3 ile 3,5 m arasındadır ve katılma-ayrılma şeritleri sağlanmış veya yoksa yolun her iki yanında yer alan 0,5 m ile 1,5 m genişliğindeki banketlerle güçlendirilmiştir. Banketlerin diğer bir avantajı kaza halinde aracın yoldan çıkabilmesi durumuna karşı şok sarsıntıları önleyebilmesidir. Kırsal yollar kurbularla donatılmamıştır ve yağmursuyu yoldan ayrılmak için hendekten akarak veya süzülme ile gözden kaybolmakta serbesttir.

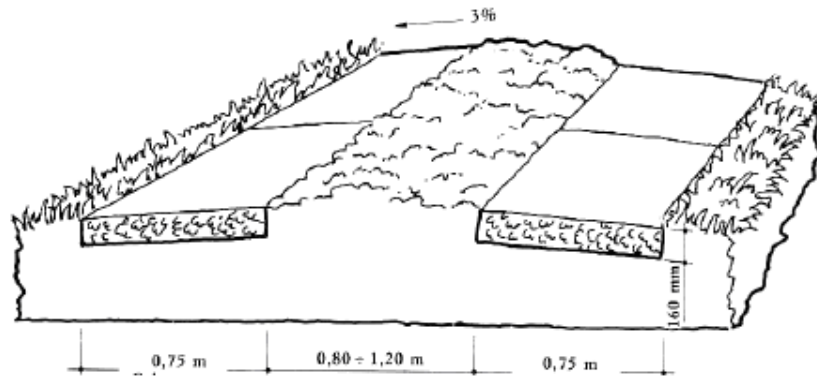
Plak kalınlığı taban zeminine ve ağır taşıt geçiş sayısına bağlı olarak 140 mm'den 200 mm'ye kadar değişim göstermektedir. Büzülme derzleri zayıf zeminlerde her 3 m'de bir uygulanırken adi (bayağı) ve iyi zeminlerde her 4-5 m'de bir uygulanır. Kırsal yollarda kullanılan betonun ana yollarda kullanılan betondan çok önemli bir farkı yoktur. Gerekli 28 günlük basınç dayanımı 30 MPa'dır. Su/çimento oranı 0,45 ile 0,5 arasındadır.



Şekil 7.4: Kırsal yollarda plak kalınlığı ve derz aralıkları [12]

Çoğu zaman zemin üzerindeki üst kısım ve bitki örtüsü alındıktan sonra plak zemin üzerine direk olarak yerleştirilir. Sadece zayıf zeminlerde kalınlığı 100 mm'den 150 mm'ye kadar değişen bir granüler alt temel tabakasına ihtiyaç duyulur.

Kırsal yollarda hafif trafik için sıklıkla ikili beton şerit yapısı ve bu iki şerit beton şeritle aynı kalınlıkta olan doğal bir zeminle ayrılır. Bu şeritlerin genişliği 0,75 m ile 0,90 m arasında her 3 ile 3,5 m'de büzülme derzleri bulunan ve kalınlıkları 160 mm ile 200 mm arasında değişen şeritlerdir. Her durumda plak boyutları yolu en çok kullanılacak taşıt genişliğine göre ayarlanmalıdır.



Şekil 7.5: Kırsal yollarda ikili beton şerit yapısı [7]

Bununla beraber ikili beton şeritler sürekli üstyapılarla karşılaştırıldığında bir takım güçlükler ortaya çıkar. Örneğin; taşıt tekerleklerinin yolu takip etme zorunluluğu bulunmayabileceğinden, taşıtların çiftliğe erişebilme manevrası sıkıntı yaratabilmektedir. Bu takdirde sürekli üst yapı kesimleri tercih edilmelidir. Ancak ikili beton şeritlere sahip üst yapılar kaplanmış yüzeyin sınırlanmış olmasından

dolayı sürekli plaklara sahip üst yapılara göre çok daha ekonomiktir ve çevreye daha iyi uyum göstermektedir.

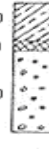
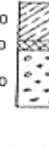
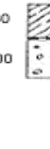


Şekil 7.6: Kırsal yollarda ikili beton şeritlerin inşası [12]

7.1.6.4 Kırsal Yollar İçin Tasarım Yöntemleri

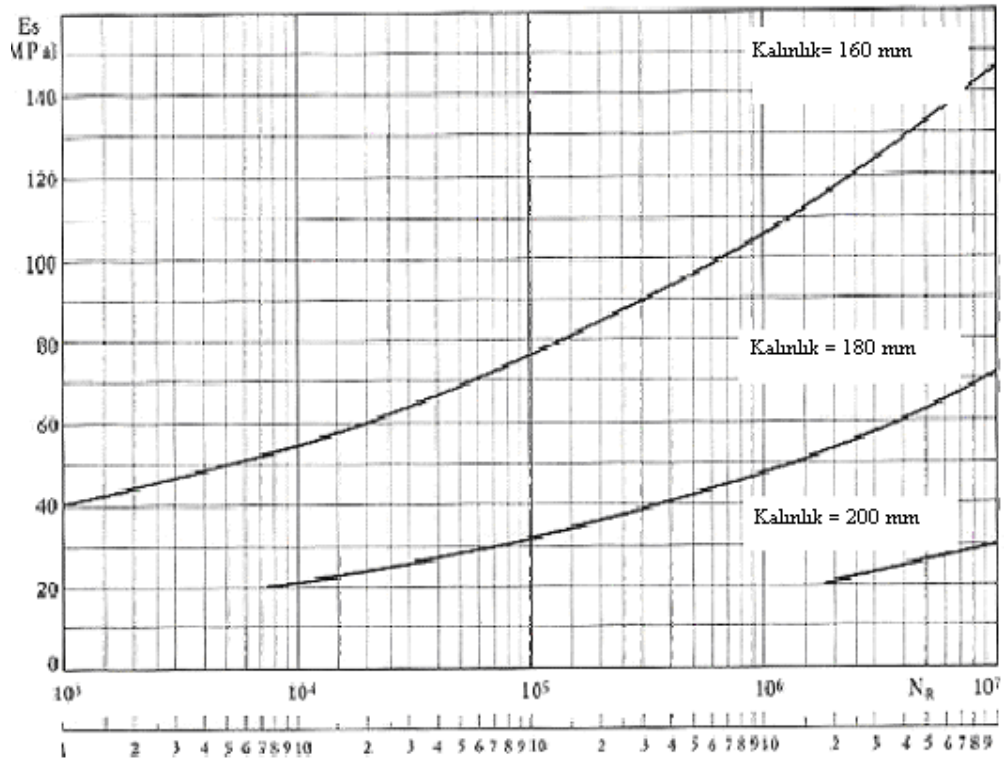
Birçok ülkede kırsal yol üst yapılarının tasarımına ilişkin kılavuzlar, el kitapları ve kurallar geliştirilmiştir. Özellikle rijit üstyapılar için Avusturya, Fransa, Hollanda ve İspanya gibi bazı Avrupa ülkeleri üstyapı katalogları oluşturmuşlardır. Bu üstyapı katalogları trafik ile taban zemini karakteristiklerine göre değişen plak, temel ve alttemel kalınlıklarını vermektedir.

Şekil 7.7’de düşük trafik hacimli karayolları için hazırlanan Avusturya tasarım katalogu görülmektedir. Bu tasarım katalogu iki yapısal çözüm sağlamaktadır: ilkinde plak granüler bir alt-temel tabakası üzerinde taşınırken, ikincisinde çimento ile iyileştirilmiş bir zemin üzerinde taşınmaktadır. Bu çözümlerden her biri, 30 yılı aşan tasarım ömrü boyunca 100 KN’luk standart dingil toplam sayısı aracılığıyla nitelendirilen altı trafik sınıfı için tanımlanmıştır.

	Beton Plak		Çimento stabilize		Granüler Alttemel	
	Bitüm Stabilize Alttemel		Sathi Kaplama			
TRAFİK HACMI (30 YILI)		I	II	III	IV	V
N (10 ⁶)		≤ 15	≤ 6	≤ 2	≤ 0.6	≤ 0.15
T I P 4	GRANÜLER TEMEL ÜSTÜNDE BETON PLAK	DONATILI ÇİMENTO BETONU			DONATISIZ ÇİMENTO BETONU	
						
		220 50 450	200 50 450	200 50 300	200 300	180 200
		Taban Zemini Elastik Modülü > 35 MN / m ² için				
T I P 5	ÇİMENTO STABİLİZE TEMEL ÜSTÜNDE BETON PLAK	DONATILI ÇİMENTO BETONU			DONATISIZ ÇİMENTO BETONU	
						
		220 50 200	50 200	180 180	180	180
		Taban Zemini Elastik Modülü > 35 MN / m ² için				

Şekil 7.7: Avusturya çimento betonu yol tasarım katalogu (kalınlıklar mm) [5]

Belçika'da plak kalınlıklarının ve alt-temel tabakalarının hesaplanmasında kullanılan diyagram Şekil 7.8'de görülmektedir.



Şekil 7.8: Kırsal yollar için Belçika'da kullanılan tasarım diyagramı [12]

Üstyapı ömrü genellikle 40 yıl olarak alınır ve trafik; tasarım ömrü boyunca 13 tonluk dingil yük tekrarının toplam sayısı (N_R) olarak açıklanmıştır:

$$N_R = N^I + \Sigma N^{II}$$

Burada;

$N^I = 300 \cdot V_{TC} \cdot a \cdot C \cdot T^I$: tipik koşullar altındaki trafik yükünün tekrar sayısı

$N^{II} = V^{II}_C \cdot T^{II}$: belirli koşullar altındaki trafik yükünün tekrar sayısı

300 = hafta sonlarında trafik yoğunluğundaki düşüşün hesaba katıldığı yıllık gün sayısı

V_{TC} = işleyen her iki yöndeki toplam taşıt sayısı; Tablo 7.1’de gösterilen, her bir yol tipi için verilmiş pik değerler yerinde yapılan çalışmalara dayalıdır.

a = ticari taşıt yüzdesi. Bu yüzde, herhangi bir verinin elde olmaması durumunda, Tablo 7.2’de görülen değerlerden alınabilir.

Tablo 7.1: Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan işleyen her iki yöndeki toplam taşıt sayısı (V_{TC}) değerleri [12]

Yol Tipi	V_{TC}
Ana Yollar (iki şerit)	900-300
İkincil Yollar(bir veya iki şerit)	300-50
Üçüncül Yollar (bir şerit)	<50

Tablo 7.2: Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan toplam trafiğin dışındaki ticari taşıt yüzdesi (a) değerleri [12]

Yol Tipi	Tarımsal Bölge	
	A	B
Ana ve ikincil	0.22	0.15
Üçüncül	0.27	0.20
A= işlenmiş arazileri (tahıl vb.)içeren tarımsal bölgeler B= geniş sığır otlaklarını içeren tarımsal bölgeler		

$C = [(1 + r)^n - 1] \div r$: trafik toplama faktörü

r = yıllık trafik artış oranı

n = üstyapı ömrü

1.1 T^I = her bir ticari taşıttaki ortalama dingil sayısına, çeşitli dingil yüklerinin transit geçiş frekansına ve üstyapı performansının yapısal-fonksiyonel olarak azalma mekanizmasına bağlı olarak değişen yük faktörü. Birincil ve ikincil (tali) yollar için $T^I = 0.17$, üçüncül yollar içinse $T^I = 0.01$ olarak alınır.

V_C^T = özel tipteki ticari taşıtların transit geçiş sayısı (Tablo 7.1)

T^{II} = özel trafikteki araç tipinin bir fonksiyonu olan bir yük faktörü (Tablo 7.3)

Tablo 7.3: Belçika’da kırsal yolların tasarımında kullanılan özel trafikteki araç tipinin bir fonksiyonu olan bir yük faktörünün (T^{II}) değerleri [12]

ARAÇ TİPİ	T^{II}
Satandart otobüs (16 ton)	0.025
Çift-dingilli kamyon (19 ton)	1.00
Çift-dingilli treyler (20 ton)	0.05
Üç-dingilli kamyon (26 ton)	0.05
Tek arka dingilli yarı treyler (21 ton) ve traktör	1.03
Çift arka dingilli yarı treyler (32 ton) ve traktör	1.05
Kamyon ve treyler (çift dingilli kamyon ve treyler)	1.05

Şekil 7.8’de görülen diyagram taban zemini üzerine direkt olarak yerleştirilen 5 m uzunluğundaki bir plakla ilgilidir. Plak kalınlığı (160, 180 veya 200 mm) trafiğin (N_R - x eksen) ve esneklik modülünün (resilient modulus E_S – y eksen) bir fonksiyonudur.

$N_R < 10^3$ koşulu için plak kalınlığı; eğer $E_S < 40$ MPa ise 180 mm veya $E_S \geq 40$ MPa ise 160 mm alınabilmektedir. Eğer $E_S < 20$ MPa ise en az 150 mm kalınlığındaki granüler bir alt-temele veya taban zeminin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulur.

Bu metotta maksimum trafik yükü ile termal gerilmelerin eşzamanlı olarak meydana gelme olasılığı yetersiz görüldüğünden hidrotermal gerilmeler hesaba katılmamıştır. Kış aylarında trafikteki düşüş ve bu periyotlar boyunca taşıt hareketlerinin kısıtlı olması nedeniyle donma-çözülme etkileri de göz önünde bulundurulmamıştır.

Düşük trafik hacimli yollarda kullanılan rijit üstyapılara, AASHTO üstyapı tasarım kılavuzunda da değinilmiştir. Prosedür, uygulama olarak ana yollar için kullanılan prosedürle yaklaşık olarak aynıdır. Aralarındaki fark güvenilirlik düzeyinden doğmaktadır. Aslında, kırsal yolların diğerlerine nazaran daha düşük düzeyde kullanılmalarından dolayı ve düşük risk düzeyine bağlı olarak önerilen güvenilirlik düzeyi %50'dir.

7.1.6.5 Yerel Kırsal Yollar İçin İnşa Metotları

Beton kırsal yollar hem mekanik tasarım yöntemleri kullanılarak hem de kılavuzlar yardımı ile inşa edilebilmektedirler.

Alt-temelin bulunduğu durumlarda gerekli kot için izin verilen tolerans 10 mm- 40 mm'dir. Trafik tarafından en büyük gerilmelerin beton plağın uç kısımlarında olmasından dolayı alt temel kalınlığı sıklıkla plağın uç kesimlerinde 150-200 mm'ye varmaktadır. Bu ekstra kalınlık, aynı zamanda plağın yanal formunun sabitlenebilmesi için veya kayar kalıp makinelerinin hareketine desteklik sağlanabilmesi bakımından gereklidir.

Beton, kayar kalıp veya sabit kalıp makineleriyle dökülebilmektedir. Bir çok müteahhit asfalt dökme ekipmanlarında basitçe yapılabilecek birkaç modifikasyonla bu uygulamayı başarıyla sağlamıştır. Genellikle elle dökülen kısımlar sadece yol kavşakları ve makinelerin kullanılamayacağı dar alanlardır.

Kırsal yolların tamamlanması basitçe yapılabilecek bir işlemdir. Öncelikle plakların yanal olarak tel fırça ile pürüzlendirilir. Daha sonra betonun korunması için kür süreci boyunca beton yüzeyine uygun miktarda reçine boyası püskürtülmelidir veya yüzey plastik kaplamalarla kaplanmalıdır.

Kırsal yolların sınırlı genişlikleri nedeniyle boyuna derzlere sıklıkla ihtiyaç duyulmazken enine büzülme derzlerine gerek duyulur. Bu büzülme derzleri, plak kalınlığının %30'u kadar derinliktedir ve betonun yayılmasından sonra olabildiğince çabuk bir süre içinde testere ile kesim işlemi aracılığıyla veya beton plastik kıvamdayken titreşimli bir kiriş vasıtasıyla plak içine dikey olarak yerleştirilen kalıcı bir şeritle meydana getirilirler.

Çalışma gününün sonunda betonun önü kapatılarak dikey bir set formu verilip inşa derzleri oluşturulur. Bölgesel çatlakların oluşum olasılığına karşı derz kısımlarında betonun iyi sıkıştırıldığından emin olunmalıdır.



Şekil 7.9: Yerel kırsal yollarda elle yapılan rijit üstyapılar [12]

7.1.7 Yerel Kentsel Yollar

Kentsel alanlarda yol üst yapılarının mimarisi ve kente uygun olması çok önemlidir. Bu bakımdan, bunların trafik yüklerini taşıma kapasitesi, devamlılık, iklime karşı, direnç, yüzey düzgünlüğü ve maliyete ilişkin teknik gereklilikler taşıması gerekir ve ayrıca ciddi bir yol tipinin gerekliliklerini karşılamalıdır. Uzun veya kompleks bir tarihe sahip şehirlerde yol üst yapılarının bakım veya yapımında kullanılan yeni materyallerin kentte bulunan bina ve diğer çevresel elemanlarla bütünleşmesi ile bu durum gerçeğe dönüşür.



Şekil 7.10: Yerel kentsel yollar [12]

7.1.7.1 Rijit Üstyapıların Kentsel Alanlara Uygunluğu

Rijit üstyapıların kentsel yol sistemleri ile paralel bir şekilde geliştiğinin söylenmesi doğru olabilir. Yüksek trafik hacimli ve ağır trafiği taşıyan kentsel yollara uyumlu olan orijinal itibarını veren dayanım ve durabiliteye, herhangi bir tipteki kentsel trafik gerekliliğini karşılayan beton; şekli, rengi ve dokusu ile eşlik etmektedir.

Taze betonun plastisitesi; girinti, çıkıntı, çukurlar, oyuklar, yuvarlanmış yüzeyler gibi uzaysal formdan oluşan elemanlarla yüzeylerin yaratılmasına olanak tanır.

Çeşitli malzemelerin karışıma eklenmesi ile ortaya çıkan kromatik düktilite herhangi bir renkteki yol yüzeylerinin elde edilebilmesini sağlar.

Aynı zamanda rijit üstyapılarla en düzgününden (jut brandası ile işlenmiş yüzeyler) en pürüzlü (ince boya tabakası ile kaplanmış, yontulmuş, şekillendirilmiş yüzeyler) olanına kadar geniş bir beton dokusu çeşitliliği bulunmaktadır.

Renk ve dokunun sayısız kombinasyonu ile hemen hemen doğal taş taklit edilebilir ve bu durumun, doğal taştan oluşan yüzeylerden daha düşük maliyetteki yüzeylerin elde edilebilmesi gibi teknik bir avantajı vardır. Beton hem bütün yolların kaplanmasında hem de kaplamanın üstünde açıkça fark edilebilecek yüzeylerin elde edilmesinde kullanılabilir. Bu tür kullanımlar yaya geçiş alanlarında ve yol üzerindeki tümseklerde sıkça görülebilmektedir.

Şekil 7.11, 7.12 ve 7.13’de betonla kaplanmış ada tipi kavşaklar görülmektedir. Ada tipi kavşakların, üstyapılarda taşıtların yanal hareketleri sonucunda kavşağın merkezinden dışa doğru oluşan yanal kuvvetlerine karşı uyum gösterebilmeleri gerekir. Bu bakımdan özellikle rijit üstyapılar kentsel alanlardaki ağır trafiğe (örneğin otobüsler) uyum gösterir. Bunun için sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılara ait birçok örnek bulunabilir.



Şekil 7.11: Belçika-Ghent’de rijit üstyapılı bir ada kavşak [12]



Şekil 7.12: Belçika-Scherppenheuvel’de rijit üstyapılı bir ada kavşak [12]



Şekil 7.13: Fransa-Chambéry’de rijit üstyapılı bir ada kavşak [12]

7.1.7.2 Kentsel Alanlarda Kullanılan Üstyapı Tipleri

En yaygın rijit üstyapı tipi 3 farklı sonlandırma tekniği kullanılarak inşa edilen donatısız plaklardır. Bu tekniklerin hepsinin yüksek mimari değeri vardır.

- Kimyasal geciktirici kullanım tekniği elde edilen yüzeyler,
- Yontma (öğütme) tekniği kullanılarak elde edilen yüzeyler,
- Ön-şekillendirme tekniği kullanılarak elde edilen yüzeyler.

Kimyasal bir geciktirici kullanıldığı teknikte yüzey, dökümden bir süre sonra yüzeydeki harcın prizini geciktiren bir ürün ile spreylene ve sonraki 4 ile 24 saatlik süre zarfında (atmosferik koşullara bağlı olarak) yüzeyde kalan harcın elenmesiyle agregaların ortaya çıkarılması için yüzey yüksek basınçlı bir su jeti ile yıkanır. Kullanılan geciktirici miktarına göre yıkama işlemi, istenen kayma direnci ve

biçimsel görünümü sağlayacak daha az veya daha çok derinlikteki bir dokuyu ortaya çıkarır. Bu teknik 80'li yıllardan beri Fransa'da uygulanmaktadır.



Şekil 7.14: Kimyasal geciktirici kullanılarak elde edilen rijit üstyapı yüzeyi [12]

Yontma tekniğinde amaç, sertleşmiş beton yüzeyinin bir tarak çekici (bush-hammer) ile işlenerek özellikle kayma direncinin sağlandığı veya diğer görünüm karakteristiklerinin elde edilebildiği üniform bir yüzeyin elde edilmesidir.

Bu işlemin yapılabilmesi için gereken minimum süre 7 gündür. Yontma tekniği; çelik veya tungsten karpitten yapılmış kafalara sahip pünomatik bir aygıtla uygulanır. Bunların her biri yüzeye değdiğinde beton üzerindeki harcı çatlatır ve agregayı yumuşak bir şekilde kırar. Tarak çekiç makinesi, arzu edilen görünüş elde edilinceye kadar kaplama üzerinden geçirilir.

Ön-şekillendirme tekniği, istenilen görünüş karakteristiklerinin verilebilmesi için taze beton yüzeyine çeşitli motiflerin ve özel çizim formlarının uygulanmasıdır. Bu formlar belirli bir plan içinde hafif bir basınçla taze beton üzerine uygulanır. Daha sonra bu formlar sıra ile yerinden alınır ve çizimler yüzeyde görünür hale gelir. Bu teknik özellikle Fransa'daki tarihi yerleşim alanlarının yenilenmesinde kullanılır.



Şekil 7.15: Ön-şekillendirme yöntemiyle elde edilen rijit üstyapı yüzeyi [12]

7.1.7.3 Kentsel Yol Üstyapılarının Tasarımında Kullanılan Yöntemler

Birçok ülkede kentsel yol üstyapılarının tasarımına ilişkin kılavuzlar, kataloglar ve standartlar geliştirilmiştir. Rijit yol üstyapılarından; üstyapı tabakalarının tasarımına ilişkin diyagram ve kataloglar geliştiren Fransa Avrupa’da en önde gelen ülkelerden biridir. Rijit plağın gerekirse alt temelin kalınlıklarını ortaya koyan grafiğe dayalı bir metot günümüzde Fransa’da kullanılmaktadır.

Tasarım trafiği, yolun tasarım ömrü boyunca yoldan geçen her taşıt sınıfının geçiş sayısının göz önünde bulundurularak hesaplanan 13 tonluk standart dingil yükünün eşdeğerlilik toplamı olarak açıklanmıştır ve bu bir katsayı ile çarpılır.

Taban zeminin taşıma kapasitesi hem laboratuvar testleri ile hem de görsel denetim yoluyla belirlenir ve Tablo 7.4’de gösterilen sembollere göre sınıflandırılır. Beton için öngörülen minimum eğilmede çekme dayanımı 4.5 MPa’dır. 2.5×10^6 standart dingilden daha fazla olan trafik için derzlerin kayma donatısı ile tespit edilmesi önerilir. Bunların kullanımı alt temel tipine göre tabaka kalınlığında daha çok veya daha az olacak şekilde azalmaya olanak tanır.

Tablo 7.4: Fransa’da taban zemini sınıflandırması [12]

P	Görsel İnceleme (13 Tonluk Dingiller)	CBR %	Taban Zemini Reksiyon Modülü K (KN/cm ³)	Zemin Tipi
P_0	Dolaşım imkansız, Aşırı şekil değiştirebilir	$CBR \leq 3$	$K \leq 3$	Suya doymun ince kil,turba, organik maddeler içeren zeminler
P_1	13 tonluk bir dingilin arkasında tekerlek izi Şekil değiştirebilir zemin	$3 < CBR \leq 6$	$3 < K \leq 5$	Plastik silt, alüvyal killer vb., suya karşı aşırı hassas
P_2 $PF1$	13 tonluk bir dingilin arkasında tekerlek izi yok Şekil değiştirebilir zemin	$6 < CBR \leq 10$	$5 < CBR \leq 6$	Alüvyal killi kum veya siltli ince malzeme, killi veya siltli kaba malzeme, ince taneli marn < %35
P_3 $PF2$	13 tonluk bir dingilin arkasında tekerlek izi yok Az şekil değiştirebilir zemin	$10 < CBR \leq 20$	$6 < CBR \leq 7$	Alüvyal ince kum < %5, killi veya siltli kaba malzeme < %12,
P_4 $PF3$	13 tonluk bir dingilin arkasında tekerlek izi yok Çok az şekil değiştirebilir zemin	$20 < CBR \leq 50$	$7 < CBR \leq 15$	Suya karşı duyarsız malzeme, kum veya kaba taneli malzeme vb, eski üstyapılar

Tablo 7.5’te gösterilen kentsel yollar ve otopark alanları için ABCP (Brezillian Portland Cement Association) rijit üstyapılar katalogu görülmektedir. Beton plak kalınlıkları CBR indeksi kullanılarak (%3 ile %20 arasında değişir) tanımlanan taban zemini taşıma gücü kapasitenin bir fonksiyonu olan Portland Cement Association (PCA) yöntemi kullanılarak elde edilir. Betonun minimum çekme de eğilme dayanımı 4.5 MPa’dır. Alt temelin granüler karışımdan, çimento ile işlenmiş karışımdan veya grobetondan oluştuğu farz edilir.

Geleneksel taşıt trafiği çoğunlukla, öndeki dingil yükü 5 ton ve arkadaki dingil yükü 10 ton olan otobüsleri içermektedir. Günlük trafik düşünüldüğünde her bir sürüş yönü için kentsel yol tipine göre değişen şu değerler göz önüne alınmıştır: 50-100-250-500-1000-2000 taşıt /gün. Tasarım ömrü 25 yıldır. Güvenlik çarpanının değeri 1.2’dir.

Tablo 7.5: ABCP'ye göre kentsel yolların ve otobüs durak alanları için beton plak kalınlığının tasarımı [12]

Sürüş Yöni Taşıt/Gün	Alt-temel Tipleri ve Kalınlıkları					
	Granüler Karşım 15 cm		Çimentoyla İşlenmiş Karşım 10 cm		Düşük Dozajlı Beton 10 cm	
	CBR %	H (cm)	CBR%	H (cm)	CBR%	H (cm)
50	3	20	3-4	18	3-8	17
	4-7	19	5-15	17	9-20	16
	8-20	18	16-20	16		
100	3-4	20	3-7	18	3-4	18
	5-13	19	8-20	17	5-20	17
	14-20	18				
250	3-4	21	3-5	19	3	19
	5-8	20	6-20	18	4-20	18
	9-20	19				
500	3-4	21	3-4	20	3	20
	5-20	20	5-20	19	4-20	19
1000	3-17	21	3-20	20	3-20	20
	18-20	20				
2000	3-5	22	3-7	21	3-4	21
	6-20	21	8-20	20	5-20	20

İspanya'da kentsel alanlardaki üstyapılara büyük önem verilmektedir. Çeşitli materyallerden oluşan tabaka kalınlıkları birçok farklı çözüm yolu kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Tablo 7.6 rijit üstyapılarla ilgili çözümler ortaya koymaktadır. Katalog aynı zamanda silindire sıkıştırılmış temel ve alt-temeller, grobeton, çimento ile iyileştirilmiş olan tabakalar gibi çeşitli tabakalarla kaplanmış olan zeminler için çözümler sunmuştur.

Tablo 7.6: İspanya rijit üstyapı tasarım katalogu [12]

Taban Zem. Trafic	S0	S1	S2
A	HP 45 Grobeton Granüler Karşım 25÷28 15 20	HP 45 Grobeton 25÷28 15	HP 45 Grobeton 25÷28 15
B	HP 45 Grobeton Granüler Karşım 23 15 20	HP 45 Grobeton 23 15	HP 45 Grobeton 23 15
C	HP 40 Granüler Karşım 23 20	HP 40 Granüler Karşım 21 20	HP 40 Granüler Karşım 21 20
D	HP 40 Granüler Karşım 22 20	HP 40 Granüler Karşım 20 20	HP 40 Granüler Karşım 20 20
E	HP 40 Granüler Karşım 18 20	HP 40 18	HP 40 16
F	HP 40 16	HP 40 14	HP 40 14
G	HP 40 14	HP 40 14	HP 40 14
Açıklayıcı Bilgiler	HP 40 = 28 günlük eğilme çekme gerilmesi 4.0 MPa'dan ve basınç dayanımı 30 MPa'dan az olmayan beton HP 45 = 28 günlük eğilme çekme gerilmesi 4.5 MPa'dan ve basınç dayanımı 32.5 MPa'dan az olmayan beton		

Üstyapı kalınlıkları Tablo 7.6'da tanımlanan 3 taban zemini sınıfına göre ve Tablo 7.7'de gösterilen 7 trafik sınıfına göre verilmiştir.

Tablo 7.7: İspanya katalogunda trafik sınıfları [12]

Kategori	Tanımlama	Tasarım Trafikği (günlük ağır taşıt*)	Kentsel Alan veya Yol Tipi
A	Çok ağır ve ağır	>800	– Ekspres yollar – Ağır endüstriyel park yolları – Uluslararası otoyollara bağlanan dahili yollar – Ağır taşıt park alanları – Uluslararası limanlar
B	Orta düzeyde ağır	200-800	– Orta trafikli ekspres yollar – Bölgesel ticari trafiği taşıyan dahili bağlantı yolları – Liman alanları – Endüstriyel merkezlerdeki orta düzey trafiği taşıyan yollar – Otobüslere ayrılmış orta düzeyli trafik
C	Orta	50-200	– Düşük ve orta yoğunluktaki otobüs trafiğine sahip ekspres yollar – Servis istasyonları – Otobüs ambarları – Yerel endüstri merkezlerindeki caddeler
D	Orta Hafif	15-50	– Düzenli otobüs trafiğinin olduğu düşük yoğunluklu bölgesel yollar – Yerel endüstriyel merkezlerdeki düşük trafiği taşıyan yollar – Ticari yollar
E	Hafif	5-15	– Sınırlı trafiğe sahip yerel caddeler ve alışveriş merkezleri – Otobüs servisinin olmadığı çift şeritli yollar – Hafif taşıtlar ve kamyonetler için park alanları
F	Çok Hafif	0-5	– Acil durum taşıtlarına bağlı olan yürüyüş yolları – Oturma alanlarındaki caddeler – Bisiklet yolları – Hafif taşıt park alanları
G	Yayalar	0	– Taşıt girişine izin verilmeyen yürüyüş yolları

* Taşıt yükleri 5 tondan az

7.1.7.4 Derz Yerleri İle İlgili Kriterler

Kentsel yollardaki rijit üstyapılar genellikle vibrasyonlu donatısız plaklardan veya poröz betondan oluşmakta olup trafik ve yük tipine bağlı olarak derzlerde kayma donatısı bulunur veya bulunmaz. Plaklar büzülme derzleri ile inşa derzleri (bunlar hem enine hem boyuna derzlerdir) ve genleşme (dilatasyon) derzleri ile birbirlerinden ayrılmışlardır. Büzülme (rötre) derzlerine hidrotermal şekil değiştirmeleri ve gerilmelerinin kontrol edilebilmesi için ihtiyaç duyulur. Büzülme derzleri betonda plak kalınlığının 1/4'ü veya 1/3'ü derinliğindeki ve 3-5 mm genişliğinde bir kesim yapılması ile sağlanır. İnşa derzleri dökümden 1,5 saat sonra oluşturulur ve genellikle çelik çubuklarla güçlendirilir.

Enine derzler arasındaki mesafe 3,5 m ile 5 m arasındadır.

Boyuna derzler yolun merkez hattına paraleldir ve termal biçim değiştirmelerin kontrol edilebilmesi için yerleştirilir. Üstyapı genişliği 4,5 m’yi aştığı zaman bu tür derzlere ihtiyaç duyulur.

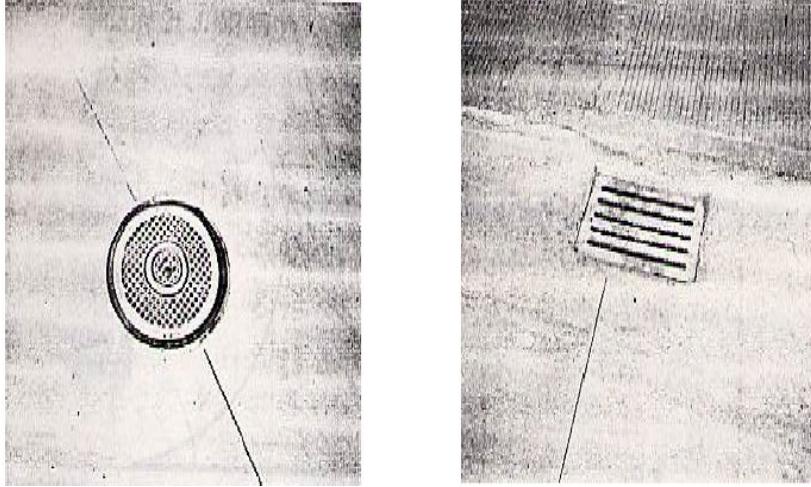
Son olarak, yapım amacı plakta sıcaklık değişiminin sebep olduğu boyutsal değişiklikleri karşılamak olan genleşme derzleri yapılmalıdır. Bu derzler 10 – 20 mm genişliktedir ve sıkışabilir malzeme ile doldurulmuştur.

Kentsel alanlardaki rijit üstyapılarda bulunan derz yerleri ile ilgili yapılan çalışmalar büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Özellikle dikkat edilmesi gereken durumlar şunlardır:

- Küçük yarı çaplı kurplar (200 m’den az)
- Üst yapıda katı elemanların olduğu durumda (ızgaralar, muayene bacası, rögar)
- Kavşaklar

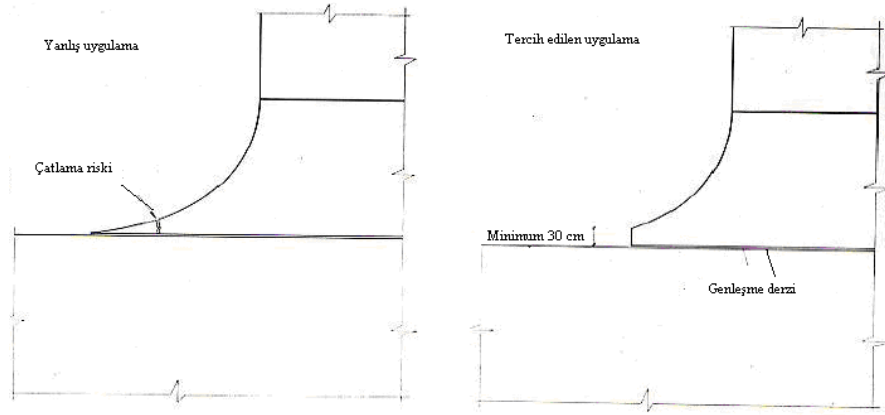
İlk durumda; genleşme derzleri, kurbun uzunluğu 100 m’yi geçtiğinde kurbun başlangıcına, bitişine ve merkezine yerleştirilmektedir.

Üstyapıda katı elemanların bulunması durumunda derzlerin kendi kendilerine şekil almalarını önlemek için büzölme ve genleşme derzleri uygulanmalıdır. (şekil 7.16)

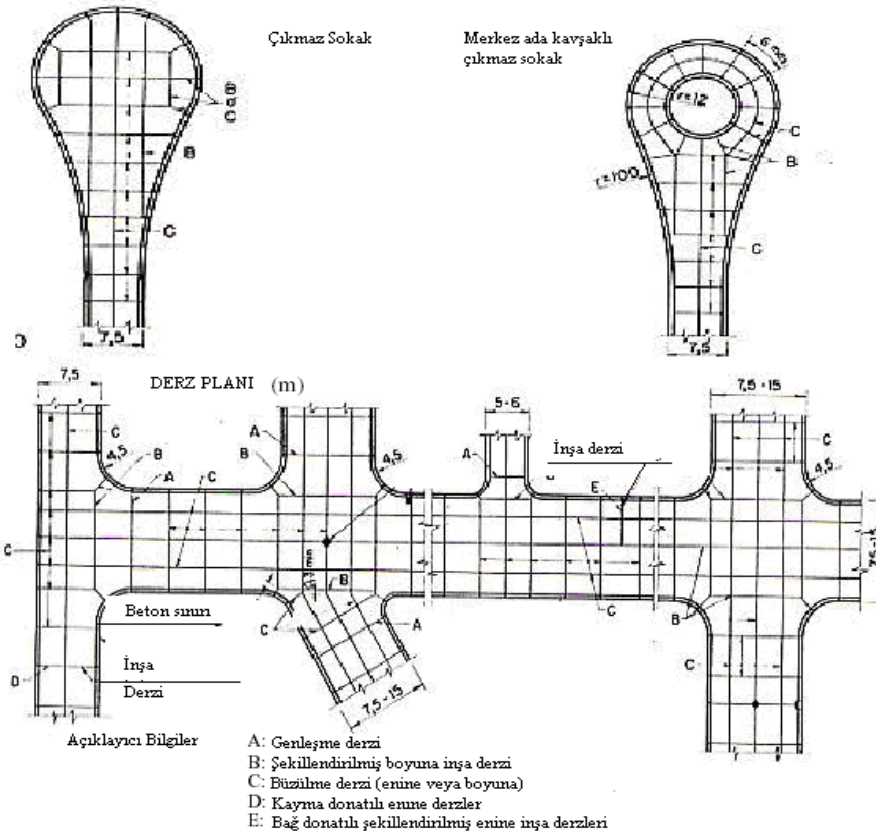


şekil 7.16: Rijit üstyapıların rijit elemanlarla birleşimi [12]

Kavşaklarda şekil 7.17’de görölen plak elemanlarından kaçınılmalıdır ve plak kenarları en az 30 cm’lik boyutlara sahip olacak şekilde biçimlendirilmelidir.



Şekil 7.17: Yol kesişimlerindeki plak formları [12]



Şekil 7.18: Kentsel alanlarda tipik derz düzenlemeleri [12]

7.1.7.5 Beton Karışım Kompozisyonu

Beton karışım kompozisyonu ekstra-kentsel yolların yapımında kullanılandan çok farklı değildir.

Farklılıklar özellikle yerel malzemelerin kullanımından ve spesifik agrega ile çimento tipleri kullanılarak yaratılan renkler ve dokulardır. Genellikle kentsel yollarda kullanılan beton karışımlar Tablo 7.8’de gösterildiği gibi oluşturulur. Öğütme tekniği kullanılarak yüzeyin dokulandırılmasına karar verildiği takdirde agregaların çoğunun, açık nedenlerden dolayı, kırılabilir ve sert olan tipte olması gerekir.

Tablo 7.8: Kentsel yol sistemlerindeki üstyapıların beton karışım kompozisyonları [12]

	Tip	Miktar
Çimento :	Normal	330-350 kg/m ³
İri agregalar : maksimum tane boyutu 20 mm	Kırma / Doğal Kireçtaşı / Silikat	1100-1350 kg/m ³
Kum tane boyutu 0/1 – 0/4 mm eşdeğer kum : > 75	Kireçtaşı / Silikat	500-750 kg/m ³
su / çimento		0.40-0.55
Katkılar	Hava sürükleyiciler Plastikleştiriciler	3-6% (don bölgelerinde)
Boya	Likit Toz	3-6 % 3 %

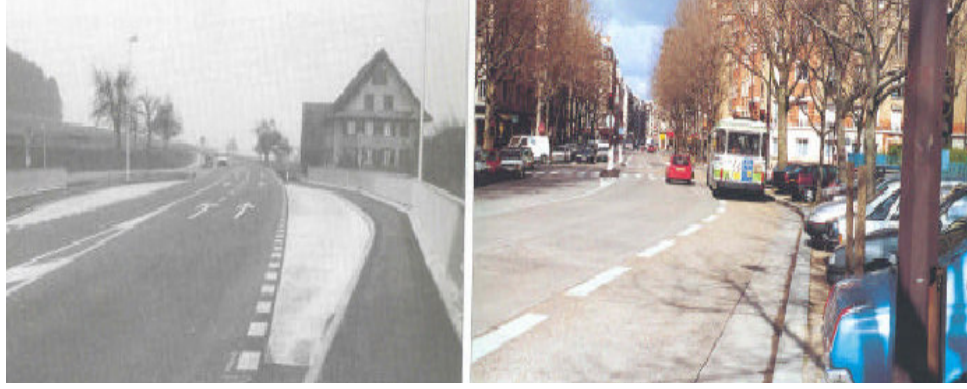
İyi durabiliteye sahip rijit bir üstyapının elde edilebilmesi için, beton karışımının Tablo 7.9’da gösterilen karakteristiklere sahip olması gerekir.

Tablo 7.9: Kentsel yol sistemlerindeki üstyapıların beton karışım karakteristikleri [12]

Hava sürükleyici katkılar	3-6 %
Abrahm konisi çökme değeri	5-10 cm
28 günlük eğilme çekme gerilmesi	4,5 MPa
Dolaylı çekme gerilmesi (Brezilya testi)	2,7 MPa

Kentsel alanlardaki genellikle küçük olan inşa alanları göz önüne alındığında çoğunlukla sahada kurulan bir beton plenti buna uymaz; sabit merkezlenmiş bir beton plentinden (fixed centralized plant) mikser kamyonlarıyla beton servisi tercih edilir.

Kentsel beton yollar, küçük olan ve zor ulaşılabilen ve buna bağlı olarak el yöntemlerinin kullanıldığı alanlar sayılmazsa genellikle mekanik yöntemler kullanılarak yapılırlar. Sınırlı boyutları ve düzensiz biçimleri ile otobüs durakları buna örnektir (Şekil 7.19).



Şekil 7.19: Rijit kaplamalı otobüs durakları [5]

Betonun yerinde kompaksiyonu düşünüldüğünde; bu göz önüne alınan trafik tipine göre değişim gösterir ve vibratör pimi veya kayar kalıp makinelerinin kullanımı ile buna gerekte kalmayabilir. Bitmiş olan yüzey, düzgün ve oyuk (çukur, boşluk) bulundurmayacak şekilde olmalıdır. Sıva malası veya montajlanmış tesviyelendirme makinesi her zaman gereklidir.

Arzu edilen kayma direnci ve istenen görünümü elde etmek için yüzeyde yapılan işlemlerden sonra üstyapı yüksek basınçtaki bir su jeti ile yıkanmalıdır. Daha sonra atmosferik etmenlerin etkisi ile betonda oluşan rötre etkisinin önüne geçilebilmesi için bir kür ürünü püskürtülür. Ön-şekillendirme tekniği yoluyla dokulandırılan tipteki üstyapılarda tüm gözenek ve boşlukların kapatılması için aynı zamanda koruyucu bir ürün (reçine veya bal mumu) uygulanır. Bu ürünler betona son görünümünü verir ve sonraki temizleme işlemlerini kolaylaştırır.

7.1.7.6 Sonuç

Düşük trafik hacimli yollarda rijit üstyapıların kullanımı ile ilgilenilmesinin arkasında kolaylıkla görülebilen iki tip avantaj vardır: teknik ve ekonomik özellikler.

Rijit üstyapılar hem yatay hem de düşey yükler altında yüksek dayanıma sahiptirler. Katı yapılar olmalarından dolayı bunların taban zeminine yükleri dağıtabilme kapasiteleri çok yüksektir ve bu bakımdan beton plaklar çok büyük bir sıklıkla herhangi bir alt temel tabakasına ihtiyaç duyulmadan direkt olarak taban zemini üzerine dökülürler. Bunun anlamı tabii ki kayda değer bir yapım kolaylığı ve malzemenin tasarruftur.

Rijit üstyapılar durabildir ve çok az bakıma ihtiyaç duyarlar. Bu iki karakteristik toplam tasarruf manasına gelir ve bu diğer tip üstyapılarla rekabette olmasını sağlar.

Bir üstyapının toplam maliyeti aslında yapım ve bakım maliyetlerinin özetidir. Bu karakteristikler düşük trafik hacimli yolların gelişmesinde çok büyük önem taşır.

Beton çok yüksek bir fayda/maliyet oranına sahip çok yönlü bir malzemedir. Esnek yol üstyapı düzleminin deformasyonlara (örneğin ağaç köklerinden dolayı oluşan deformasyonlar) karşı duyarlı kalması veya bakım işlemlerinin kompleks hale gelmesi ve yol enkesitinin çok dar olduğu yerlerde ve engebeli alanlara erişimin zor olmasından dolayı bakım işleri yüksek maliyette olmaktadır. Tüm bu durumlardan dolayı çok az veya hiç bakım talebi olmayan rijit üstyapı oldukça ekonomik bir çözümdür.

7.2 Yüksek Trafik Hacimli Trafiğin Karayollarında Rijit Üstyapı Uygulamaları

İnsan vücudunda damarların önemi ne kadarsa bir ülkedeki yüksek trafik hacimli yolların önemi de o kadardır. Bu tür yollar temel anlamda modern yaşam ve ekonomik gelişim için ihtiyaç duyulan insan ve yük taşınmasına olanak verir.

Yüksek trafik hacimli yollar uzunluk bakımından %20'den daha az olan bir kısmı temsil etmesine rağmen özellikle ağır kamyon ve otobüs trafiğinin %80'ini temsil etmektedir. Yüksek trafik hacimli bir yoldaki trafik akımından meydana gelen bir kesinti binlerce kara yolu kullanıcısının gecikmesine, kazaların artmasına, yakıt kullanımının ve çevre kirliliğinin artmasına sebep olur. Şeritlerdeki tıkanma hem halkın ulaşımını hem de fabrikalara yük taşıyan, zaman duyarlılığı olan ticari taşıtların ulaşımını büyük ölçüde etkiler. Şerit tıkanmaları aynı zamanda karayolu kullanıcılarının kaza yapma olasılığını büyük ölçüde arttırır.

Bu tür yollar genellikle gittikçe artış gösteren ve bir ülkenin ticari yaşam akımı olan kamyon ve otobüslerin büyük hacmini ve ağırlığını taşır. Bu yollardaki üstyapıların milyonlarca ağır dingil yükünü taşıması gerekir ve bundan dolayı bu yapılardaki malzemelerdeki herhangi bir kusur veya zayıflık şeritlerde bakıma, rehabilitasyona veya yeniden yapıma sebep olan detorasyonların, kırılmaların oluşmasına sebep olur. Bu bakımdan yüksek trafik hacimli yolların oldukça güvenli olması gerekir ve bu tip yollarda iyi malzemelerin kullanılması gerekir. Portland çimentosu betonundan oluşan rijit üstyapılar, çok ağır yüklemeleri uzun süre boyunca şeritlerde çok az bir

bakıma ihtiyaç duyarak güvenle taşıyabilmeleri nedeni ile dünyanın birçok yerinde yüksek trafik hacimli yolların ve havaalanlarının yapımında kullanılmaktadır. [13]

7.2.1 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarının Rijit Üstyapılar Kullanılarak İnşa Edilmesindeki En Önemli 10 Sebep

1. Rijit üstyapılar, herhangi bir süre boyunca herhangi bir tekerlek basıncını, ağırlığını ve ağır trafik hacmini taşıyabilecek şekilde tasarlanabilir ve inşa edilebilir.
2. Rijit üstyapılar, belirli bir zaman süreci içinde minimum şerit kapanmasına neden olacak minimum bakımla ağır trafiği taşıyacak şekilde dizayn edilebilirler.
3. Rijit üstyapıların, yüksek trafik hacimli yollarda oldukça büyük önem taşıyan, güvenilirlik faktörü oldukça yüksektir. Rijit üstyapılar dizayn edildikleri şekilde performans gösterirler. Aslında, yüksek trafik hacimli yollarda betonun sıklıkla seçilmesinin nedeni budur.
4. Rijit üstyapıların ilk yapım maliyetinin yüksek olmasına karşın gelecekte yapılacak olan bakım ile rehabilitasyon maliyetlerinin daha düşük oluşu bu durumu dengeler ve bu maliyetler şöyle dursun, kullanıcıya ait maliyetler ertelenmiş olur.
5. Rijit üstyapılarda, çok yüksek bir güvenilirlikle on yıllar boyunca trafik aksamalarına neden olabilecek şerit kapamalarına çok az (hemen hemen hiç) ihtiyaç duyulur.
6. Rijit üstyapılarda sıcak havalar ve yavaş hareket eden trafik altında tekerlek izi oluşumlarına rastlanmaz.
7. Rijit üstyapılar uygun malzeme seçimi ve doğru inşa edilme durumunda soğuk iklimlerde durabil olacak şekilde dizayn edilebilir. Asfalt üstyapılarda görülen düşük sıcaklık çatlakları rijit üstyapılarda görülmez.
8. Rijit üstyapılar doğru kalınlık, temel, derz ve dayanım göz önüne alındığında tekrarlı ağır dingil yük dağıtımına karşı koyabilecek şekilde dizayn edilebilir.
9. Doğru tasarım ile yapım uygulandığında rijit üstyapıların bakımı ve şerit kapamaları minimum düzeydedir. İhtiyaç duyulan sürtünme ve düzgünlüğü korumak için yüzeyin yeniden dokulandırılması işlemi bir elmas öğütücü ile sağlanabilir.

10. Belirli bir süre sonra yapısal bir iyileştirmeye ihtiyaç duyulursa bir takviye tabakası 10 ile 20 yıl boyunca ihtiyacı karşılar ve bu gelecek 10 yıllar boyunca belirli sürelerde tekrarlanarak büyük maliyet tasarrufları elde edilir.



Şekil 7.20: Rijit üstyapılar beklenen performansı gösterecek yüksek bir güvenilirlik düzeyinde tasarlanabilir ve inşa edilebilirler [12]

7.2.2 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarının Tanımlanması

Yüksek trafik hacimli yollar günlük trafiğin büyük kısmını taşıyan tipik olarak tasarlanan ana yollardır (arterler, kolektörler veya mahali yollar). Dünyada günlük araç trafik tanımının bölgeden bölgeye değişiklik göstermesi, bu anlamdaki bir tanımlamayı gereksiz kılar. Bununla birlikte üstyapının bakımı veya rehabilitasyonu için trafik şeritlerindeki kapama trafikte büyük gecikmelere ve tıkanıklıklara sebep oluyorsa tüm bu yollar pratik anlamda yüksek trafik hacimli yollar olarak göz önüne alınabilir.

En iyi tipteki yüksek trafik hacimli yollar günde yüz binlerce araç (her iki yönde) taşırlar ve kamyon trafiğinin %10 olduğu varsayılırsa; yol her iki yönde günde otuz binin üzerinde kamyonu taşıyabilir. 1 yılı aşkın bir süre içinde bu durum bölünmüş trafik şeritlerinin sıklıkla birinden diğerine 10 milyon kamyon taşınması demektir (günde 2700'den 27000'e kadar). 20 yılı aşkın bir süre için verilen bir trafik şeridindeki toplam kamyon sayısı 100 milyona veya daha fazlasına varabilmektedir (Chicago'da ki bir anayolda gelecek 40 yılda bunun 400 milyon olacağı tahmin edilmektedir).

7.2.3 Yüksek Trafik Hacimli Karayolları İçin Önerilen Rijit Üstyapılar

Yüksek trafik hacimli yollar için bir çok ülke tarafından kullanılan şu tipte rijit üstyapılar bulunmaktadır. [12]

- **Derzli-Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar:** Dağıtılmış donatı içermeyen rijit üstyapılardır fakat çatlakların kontrol edilebilmesi için kısa derz aralıkları (4 –5 m) ile yeterli plak kalınlıklarına ve derzlerde oluşabilecek kusurların kontrol edilebilmesi için derz yük– transfer elemanlarına sahiptirler.
- **Sürekli-Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar:** Enine derz içermeyen rijit üstyapılardır ve enine rötire çatlaklarının oldukça az miktarda tutacak şekilde yapılan tasarıma göre boyuna donatı içermektedirler. Derzler sadece inşaat derzi olarak ve eğimli kesimlerde vardır.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, ilk yapım maliyetinin daha düşük oluşu ve yapım ile onarımın nispeten kolay olması sebebiyle dünya çevresinde genellikle kullanılan üstyapı tipidir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, yüksek trafik hacimli trafiğin taşındığı yollarda büyük başarı elde edilmesi için bazı aracı kurumlar tarafından en sık kullanılan üst yapı tipidir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıları düzenli olarak inşa edilen kurumlar, bu tipteki rijit üstyapıları maliyet bakımından derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılarla rekabet edebilir bulmaktadırlar. Fakat sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıları inşa etmemiş olan kurumlar, bu tip üstyapıların ilk maliyetini gerekli olan deneyim sürecinden dolayı derzli donatılı tipteki rijit üstyapılara oranla daha yüksek bulmaktadırlar.

- **Derzli-Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar:** Bu tipteki rijit üstyapılar birçok kurum tarafından önerilmektedir. Derzli donatılı tipteki geleneksel rijit üstyapılar derzlerde oluşan kırılmalar (ihtiyaç duyulan geniş hareket nedeni ile) ve rötire çatlak kırılmaları (yetersiz miktardaki donatı nedeni ile) nedeni ile birçok projede nispeten zayıf performans göstermişlerdir. Bu durum daha güvenilir performansın elde edilebilmesi için özellikle daha kısa derz aralıkları ve daha yüksek miktarda donatı içeren tasarımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

7.2.4 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Sıklıkla Rijit Üstyapıların Kullanılmasının Nedeni

Yüksek trafik hacminin taşındığı yollar için rijit üstyapılar daha yüksek güvenilirlik (vaktinden önce oluşabilen kırılmaların riski azdır) , daha uzun servis ömrü, minimum bakım ve minimum şerit kapama ihtiyacı nedeni ile uzun dönemde en iyi değer olarak göz önüne alınırlar. Önceki servis ömrü periyodundan sonra rijit üstyapılar herhangi bir takviye tabakasına ihtiyaç duyulmadan (elmas öğütücü – diamond grinding) yeniden yapılandırılabilirler veya ek bir trafiğin 10 yıllar boyunca taşınması için takviye tabakası tabaka ile kaplanabilirler. Rijit üstyapılar 20 yıldan 50 yıla kadar veya tasarım gerekliliğine göre değişen uzun yıllar boyunca hizmet edebilecek şekilde dizayn edilebilirler. Tipik olan 20 yıldan 50 yıla kadar olan ilk ömür süresince, beton beklenilenden daha uzun süren tasarım ömürleri ile ve trafik yükleri ile uzun dönemde en iyi üstyapı çözümünü oluşturmaktadır. Rijit üstyapılar en ağır trafik yüklerine bile dayanabilecek şekilde dizayn edilebilirler. İyi tasarlanmış ve inşa edilmiş rijit üstyapıların rijitliği yapımdan sonra uzun bir süre boyunca düzgün bir sürüş yüzeyinin ve daha konforlu, daha güvenilir yol yüzeylerinin oluşturulmasına olanak tanır. [12]



Şekil 7.21: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar ağır trafikli karayolları için uygulanabilir bir alternatiftir [12]

7.2.5 Üstyapı Tipinin Seçimi

Belli bir yol için bir üstyapı tipinin seçiminde göz önüne alınması gereken bir çok faktör bulunmaktadır. [13]

- Beklenen kamyon trafik düzeyi
- İlk yapım maliyeti ve gelecekteki bakım giderleri
- Arzu edilen servis ömrü, gelecekteki bakım ve rehabilitasyon gereklilikleri
- Tasarımın beklenildiği gibi performans gösterebilmesi – güvenilirlik (yüksek trafik hacimli herhangi bir yoldaki bozulma büyük önem taşır)
- Taban zemininin tipi ve hacim değişim potansiyeli (sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar temelde oluşan hareketleri kontrol altında tutabilir)
- Kurum ve müteahhidin deneyimleri, ekipmanı ve laboratuvarı
- Bölgesel iklim
- Yapım güçlükleri (şeritlerdeki değişimlerin kapsamı kaplama işlemlerinde güçlüklerle sebep olur)
- Bitişik şeritlerin ve kurpların varlığı ile tasarımı
- Yapım süresi ve alternatif yolların kullanılabilirliği
- Bölgesel deneyimler ve geçmişteki performanslar
- Uzun durabiliteye sahip malzemelerin elde edilebilirliği

Derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki üstyapıların uygulamaları, zayıflıkları ve dayanımlarının özetlenmesi için Tablo 7.10 hazırlanmıştır. Doğru tasarım ve durabil malzemelerle inşa edilen hem derzli donatısız hem de sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar uzun ömürlü, düzgün sürüş yüzeyine sahip yolların oluşturulması için gerekli potansiyele sahiptirler. Bununla birlikte belli tipteki rijit üstyapılar belli durumlarda diğerlerine göre daha uygundur

Tablo 7.10: Rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajlarının özeti [12]

Üstyapı Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar	Anahtar Tasarım Elemanları	Uygulama Yerleri
Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar	• Güvenilir tasarım • Her bölgede kullanılabilir (kavşaklar dahil)	• Artan derz maliyeti • Artan derz bakım çalışmaları • Derzlerin gelecekteki üstyapı performansını zayıflatma olasılığı	• Etkili derz tasarımı (derz aralığı, yük transferi, dolgu malzemeleri)	• Her yerde uygulanabilir
Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar	• Derz bulunmaz (inşa derzleri hariç) • Konforlu sürüş • Düşük bakım • Uzun hizmet ömrü • Asfal betonundan bir tabaka ile takviye durumunda yansımaya çatlakları görülmez	• Yüksek ilk maliyet • Karmaşık yapım • Deneyimli müteahhid gerekliliği • Rehabilitasyon (yamalama) oldukça maliyetlidir ve zordur	• Etkil donatı tasarımı (donatının örülmesi ve montajı dahil) • Sağlam temel destekliği • İnşa derzi yapımı ve tasarımı	• Yüksek hacimli trafiğin taşındığı kentsel yollar • Kırsal yollar • Kompleks geometriye yollarda kullanılmaz

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı hemen hemen bütün bölgelerde uygulanabilir olduğuna inanılan güvenilir tasarımlar ortaya koymuştur. Bu tip yollar kompleks değildir ve portland çimentosu betonu ile inşa edilen rijit üstyapı tiplerinden ilk yapım maliyeti en düşük olanıdır. Bunun yanında son 20 yıldır en geniş kullanıma sahip olan rijit üstyapı tipidir. Belki de başarılarında gerekli olan en kritik tasarım elemanı, etkili derz aralıklarını ve yeterli yük transferlerinin sağlanmasını kapsayan etkili 8 enine derz tasarımıdır. Bununla birlikte derz sayısının artışı ile tasarımda daha büyük derz bakım ihtiyaçları doğar. Bunun dışında derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların tasarımı, gelecekteki rehabilitasyonu, enine derzlerin ve bunların rehabilitasyon performansı üzerindeki potansiyel etkilerinin dikkatle göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuştur.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı yüksek sınıftaki, yüksek trafik hacimli karayollarında rağbet gören üstyapı tipidir. Genellikle yüksek yapım maliyetlerine sahiptirler fakat, uzun yıllar boyunca bakım maliyetleri düşüktür ve uzun yıllar boyunca düzgünlüklerini koruyabilmektedirler. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, uzun hizmet ömürlerinin ve sıkça görülen kapanmaların veya diğer trafik problemlerinin (kesilmelerinin) önüne geçmek isteyen karayolu kurumlarını etkileyen düşük bakım ihtiyaçları nedeni ile kentsel alanlarda belki de en uygulanabilir olan rijit üstyapı tipidir. Bununla birlikte bu tip rijit üstyapılar uzun

ömürlü ve düşük bakım maliyetinin istendiği kırsal karayollarında da uygundur. Birkaç karayolu kurumunun sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı inşası ile ilgili iyi bir deneyime sahip olmamalarına rağmen (zayıf tasarım ve inşaat sebebiyle), sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar bir çok ülkedeki yüksek trafik hacimli yollarda karayolu kurumları tarafından geniş bir kullanıma sahiptir. Çatlakların genişlemeye başlaması ve yapısal boşlukların (punchout) ortaya çıkması ile birlikte sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların mümkün olduğu kadar çabuk bir şekilde rehabilite edilmesi gerekmektedir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tümüyle donatıya sahip olması iyi performans göstermesini sağlarken büyük maliyetlerin de ortaya çıkmasına neden olur. Asfalt betonu ile oluşturulan takviye tabakaları herhangi bir yansıma çatlağının oluşmaması nedeni ile sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarla çok iyi çalışır ve bu göz önünde bulundurulması gereken önemli bir avantajdır. Bazı kurumlar yapıda daha düşük gürültünün sağlanması ve bunun yansıma çatlaklarına neden olmadığı durumlarda özel asfaltik ince bir yüzeyle beraber kompozit üstyapılar meydana getirmişlerdir.

Özetle, portland çimentosu betonu kullanılarak inşa edilen üstyapıların seçiminde farklı tasarım gereklilikleri göz önünde bulundurularak tüm bu özel faktörlerin ve her bir üstyapı tipinin performans yeteneklerinin dikkate alınması gerekir. Bölge ve tasarım bağlamında her inşaat durumu farklıdır ve daha önce anlatılan faktörlerin bazı durumlarda diğerlerinden daha büyük önemi olacaktır. Yapı – ömür maliyet analizi üstyapı tipinin seçimine yardımcı olmak amacıyla göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte, verilen koşullar altında en uygun üstyapı tipinin tanımlanabilmesi için bölgesel deneyimlerin ve mühendislik kanılarının da eklenmesi gerekir.

7.2.6 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapıların İnşasında Kullanılan Betonun Önemli Özellikleri

Portland çimentosu betonunun özellikleri rijit üstyapıların uzun dönemdeki performansını etkiler ve 3 gruba ayrılabilir.

- Portland çimentosu betonunun özellikleri üstyapının tepkilerine etki eder. (defleksiyonlar-sehimler, biçim değiştirmeler ve gerilmeler)
- Portland çimentosu dayanımı yorulmaya ve aşınma direncine etki eder.
- Portland çimentosu betonunun durabilitesi malzeme ve iklime bağlı olarak ortaya çıkan problemlere etki eder.

7.2.6.1 Üstyapı Tepkilerine Etki Eden Portland Çimentosu Betonunun Özellikleri

Aşağıda listelenen portland çimentosu betonunun ana özellikleri üstyapının yapısal tepkilerine etki eder.

- Elastisite modülü ve poisson oranı (Daha düşük modüller, daha düşük gerilmeler manasına gelir.).
- Termal genleşme katsayısı (Performans üzerinde büyük etkisi vardır. Daha önce hiç ölçülmemiştir fakat tasarım ve performans için kritik bir durum oluşturur. Düşük olması daha iyidir.)
- Son rötre etkileri yüzey rötresine etki eder. (yukarıdan aşağıya çatlamlar, derz bozulmalarına etki eden bükülmeler, derz açılmaları ve çatlamları)

Portland çimentosu betonu ile inşa edilen rijit üstyapılarda portland çimentosu betonu kritik gerilmelerinin minimize edilebilmesi için düşük elastisite modülüne ve düşük birim hacim ağırlığına sahip bir portland çimentosu betonu karışımı arzu edilir. Bununla birlikte birçok durumda elastisite modülündeki azalma, çatlamlarda artışa sebep olabilecek portland çimentosu betonunun dayanımında da azalmaya sebep olur. Aynı zamanda düşük elastisite modülüne sahip portland çimentosu betonu, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarında artışa sebep olabilecek portland çimentosu betonu plak defleksiyonlarının artışına neden olur.

Belki de en kritik özellik, en az önem verilen, betonun genleşme katsayısıdır. Bu katsayı, ısısal bükülmeleri (kritik çekme gerilmesi) ve derz ile çatlak açılmalarını (derz yük aktarım verimliliğinin azalması) etkiler. Düşük termal genleşme katsayısı ve düşük nihai rötrenin her ikisi birden plaktaki kıvrılmaları ve çarpılmaları azaltacaktır. Bunun sonucunda da plakta daha düşük seviyede çatlamlar olacaktır. Aynı zamanda daha düşük derz hareketleri derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda daha düşük derz bozulmalarına, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda da daha düşük düzeydeki çatlak detorasyonlarının (bozulmalarının) elde edilmesine olanak sağlar.

7.2.6.2 Rijit Üstyapıların Yapısal Performansında Beton Dayanımın Önemi

Portland çimentosu betonunun dayanımının, belli büyüklükteki tekrarlı eğilme gerilmesi altında, portland çimentosu betonundan oluşan plağın potansiyel yorulma

çatlaması üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu bilinmektedir. En yaygın portland çimentosu betonu dayanım ölçümleri şunlardır:

- Esnek kiriş testi
 - Üçlü nokta yüklemesi (yapısal tasarım için kullanılır.)
 - Merkezi yükleme
- Çekmede çatlama dayanımı
- Basınç dayanımı

Dayanım parametrelerinin bu testlerin korelasyonundan elde edilmesi ile birlikte aralarındaki ilişki benzer değildir ve karışım ile özellikle agrega tipine göre değişim göstermektedir. Basınç dayanımdan eğilme dayanımının (kopma modülü-bükülmeye zorlanan bir malzeme numunesinde, kırılma anında okunan maksimum gerilme direnci) tahmin edilebilmesi için sıklıkla kullanılan ilişki şudur :

$$MR = 3,62x(f'_c)^{1/2}$$

MR = Kopma modülü, kPa (üçlü nokta yüklemesi)

f'_c = Basınç dayanımı, kPa

Portland çimentosu betonunun eğilme mukavemetindeki bir artışın genellikle tasarım ömrünü arttırdığına inanılmaktadır. Bununla birlikte bu etki diğer faktörleri de kapsamaktadır. Portland çimentosu betonunun dayanımındaki bir artışı, gerilme artışını hafifleten pozitif bir etkiye sahip olan portland çimentosu betonunun elastik modülündeki artış izler. Ayrıca daha yüksek dayanımlı beton daha yüksek termal genleşme katsayısına (termal bükülme büyüklüğünü artırır) ve rötre katsayısına (plak çarpılmalarını artırır) sahiptir.

Yüksek trafik hacmine sahip portland çimentosu betonuyla inşa edilen rijit üstyapılar genellikle 20 yıldan 60 yıla kadar ömre sahip olabilecek şekilde tasarlanabilmektedir. Bu yüzden beton malzemesinin donma-çözülme gibi çevresel etkilere direnç gösterebilmesi oldukça önemlidir. Geçmişte yapılan araştırmalar beton kalitesinin şu durumların elde edilmesi ile oldukça geliştiğini göstermiştir :

- Her m³'teki minimum çimento içeriği 335 kg'dır. (yüzeyin durabilitesini etkiler)
- Maksimum su/çimento oranı 0.45'dir.

- Çökme (slump) 100 mm'den azdır (eğer su azaltıcılar kullanılmamışsa).
- Agregalar güvenilir, sağlam, temiz, durabil ve iyi gradasyonludur.
- Donma çözülme ortamı için uygun hava boşluğu sistemi.
- Doğru oranda yapılan karıştırma, yerleştirme, sonlandırma ve kür işlemleri.

Bir çok rijit üstyapının, 10 ile 20 yıl sonra sahadan alınan karotlarla yapılan testlerde oldukça yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Aksi taktirde uzun dönemde iyi performansın gözlenmesi beklenemez. Bu yüksek dayanımın (örneğin 45'ten 70 MPa'a kadar) ne kadar sürede oluştuğu bilinmemektedir. Teori, yüksek dayanımda betona sahip olmayan rijit üstyapıların uzun ömürlü olamayacağını göstermiştir.

7.2.6.3 Tasarım Ömrü Boyunca Sürdürülebilecek Yeterli Beton Durabilitesinin Önemi

Beklenen koşullar altında uzun bir ömrün ve düşük bakımın sağlanabilmesi için karışımda kullanılan agreganın ve matrisin (bağlayıcı ve ince agregadan meydana gelen karışım) durabilitesi gereklidir. Beton donma-çözülme, ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma, kimyasallar, buzlanmayı önleyici elemanlar vb. sert hava koşullarına karşı uzun süre dayanım gösterebilmelidir. Çevre ile beton arasındaki etkileşimler sonucunda zamanla beton özelliklerinde kayda değer değişimler görülür. Devamlı çimento hidratasyonu nedeni ile uzun dönemli dayanım kazancına benzer bazı değişiklikler pozitif olabilmektedir. Diğer değişikliklerin sonucunda normalden önce gelişen üstyapı bozulmaları görülebilmektedir.

Malzeme ile ilişkili bozulmaların gelişimindeki ana mekanizmalar ve bunların önlenmesine/azaltılmasına ilişkin yaklaşımlar şöyle özetlenebilir :

Şu tür kimyasal mekanizmalar betonda zamanından önce detorasyonlara neden olur:

- **Alkali-Silika Reaksiyonu:** Boşluk solüsyonundaki alkaliler ile (baz- külsüt) agregadaki reaktif silika (silis-çakmaktaşı) arasındaki reaksiyon genleşen bir jel formunun oluşmasına ve agrega partiküllerinin özelliklerini kaybetmesine neden olur. Bunun sonucunda bütün plak alanı üzerinde harita çatlakları ve derzlerde kabarıp dökülerek parçalanmalar oluşur. Yeni betonda alkali-silika reaksiyonunun önlenmesi için agregaların reaktifliğinin test edilmesi ve bununla birlikte reaktif olmayan agregaların kullanılması gerekir. Eğer bu ekonomik olarak yapılabilir değilse düşük alkali çimentoların, ASTM C-618 sınıfındaki uçucu küllere benzer

puzolanların veya lityum temelli katkı maddelerinin kullanımı göz önünde bulundurulmalıdır.

- **Alkali-Karbonat Reaksiyonu:** Bu reaksiyon boşluk solüsyonundaki alkalilerle karbonat/dolomitik (kalsiyum ve magnezyum asit karbon tuzlarından bileşik bir kayaç) agregalar arasındaki bir genleşme reaksiyonudur. Alkali-silika reaksiyonuna benzer şekilde alkali-karbonat reaksiyonu da aynı zamanda tüm plak üzerinde harita çatlaklarına, derz kabarmalarına ve patlamalarına sebep olur. Bunu önlemek için alkali karbonat reaksiyonuna karşı hassas olan agregalardan kaçınılması veya hacimce azaltılması yada hassas agregaların kaliteli agregalarla harmanlanması gerekir. Betondaki alkalilerin varlığı sınırlandırılmalıdır.

- **Sülfat Etkisi:** Harici sülfat kaynaklarının (örneğin; yeryüzü suyu, buzlanmayıcı önleyici kimyasallar) çimentodaki kalsiyum-sülfoalüminyumlarla reaksiyona girmesi ile harici sülfat etkisi oluşur. Dahili sülfat kaynaklarının çimentodaki kalsiyum – sülfoalüminyumlar birleşmesi ile benzer durum ortaya çıkar. Sülfat etkisi ile derz yakınlarında ve plak sınırlarında çatlamlar meydana gelir veya tüm plak alanı üzerinde harita çatlakları gözlenir. Harici sülfat etkisinin önüne geçilmesi için; su/çimento oranının 0,45'in altında tutulması, çimentodaki trikalsiyum –alüminyum içeriğinin minimize edilmesi, karıştırılmış çimentonun kullanılması veya puzolanların kullanılması gerekir. Dahili sülfat etkisinin önlenmesi içinse; yavaşça çözülebilen dahili sülfat kaynaklarının minimize edilmesi, çimentodaki trikalsiyum-alüminyumun minimize edilmesi ve yüksek kür sıcaklıklarından kaçınılması gerekir.

Bu kimyasal mekanizmalara ek olarak soğuk iklimlerde görülen donma-çözülme detorasyonları şu şekilde oluşur :

- **Sertleşmiş Çimento Şerbetinin Donma-Çözülme Detorasyonu:** Tekrarlı donma-çözülme döngüsü, ölçeklenmeye (hacim değişikliği) sebep olacak doygun çimento bulamacı formuna, genellikle başlangıçta derz yakınlarında görülen harita çatlaklarına veya kabarıp dökülmelere veya çatlaklara sebep olur. Bu döngü aynı zamanda beton matrisinin dahili bozulmalarına (kopma, parçalanma) sebep olur. Bu tür bozulmaları önlemek için; beton karışımına koruyucu hava boşluk sisteminin kazandırılması için doğru hava sürükleyici katkı maddelerinin eklenmesi gerekir.

- **Agreganın Donma-Çözülme Detorasyonu:** Bu tip detorasyonlar, derzlerde paralel olan çatlamlara, durabilite çatlamlarına (D-cracking) ve daha sonra kabarıp dökülmelere sebep olur. Bu problem yeterli donma-çözülme direncine sahip agregaların kullanılması ile elimine edilebilir. Bununla beraber alışagelmış standartlardan farklı tipteki agregaların kullanılması durumunda, maksimum agrega boyutunun azaltılması ve durabilite çatlaklarının hafifletilmesi için taşınan serbest suyun üstyapının altından uzaklaştırılması amacı ile etkili drenaj sistemlerine (geçirimli tabaka) ihtiyaç duyulur.

- **Buzlanmayı Önleyici Kimyasallar Sebebiyle Oluşan Dekorasyonlar :** Buzlanmayı önleyici kimyasallar derzlerde betonun doyunluğunda artışa, çatlaklara ve betonun donma çözünme etkisi ile oluşan detorasyonlarında artışa neden olabilir. Bu kimyasallar çimentodaki hidrasyon elemanları ile kimyasal olarak etkileşime girebilirler. Bu durum beton boşluk (por) sisteminin olası ayrışması ve/veya derz ve çatlaklarda kirlenmelere neden olan çimento şerbetinin hidrasyonu ile plak yüzeyinde ölçeklenmelere veya çatlamlara neden olabilir. Bu etkinin hafifletilebilmesi için 335 kg/m³'lük minimum çimento içeriğinin sağlanması, su/çimento oranının 0,45'i geçmeyecek şekilde sınırlandırılması ve buzlanmayı önleyici kimyasalların kullanılmasına izin verilebilmesi için kürden sonra minimum bir 30 günlük kuruma periyodunun beklenmesi gerekir.

Şuna dikkat çekilmelidir ki yukarıda sözü edilen süreçlerin (kimyasal reaksiyonlar veya donma-çözülme döngüleri), beton taze iken, yıkıcı etkileri maksimumdur. Portland çimentosu betonu ile inşa edilen plağın altındaki uygun bir drenaj betondaki serbest su miktarını azaltacaktır ve bunun sonunda daha durabil bir üstyapı elde edilebilecektir. Önerilen drenaj sistemlerine ileriki bölümlerde değinilecektir.

7.2.7 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapıların İnşasında Önem Arz Eden Kritik Noktalar

Yüksek trafik hacimli rijit üstyapıların inşa aşamalarının her biri ayrı önem taşımaktadır ve üstyapı performansına direkt etkileri söz konusudur.

7.2.7.1 Taban Zemini Hazırlıklarının Önemi

Üstyapının üniform ve tutarlı bir platform tarafından desteklenmesini garantiye alınması için; üstyapı tasarım süreci boyunca yer altı zeminindeki yatay ve düşey

değişimler, nem içerikleri, yoğunlukları ve su seviyesi derinliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu elemanlar uygun saha (yer altı incelemeleri) ve laboratuvar test programları ile ölçülebilmektedir. Daha da önemlisi kaplama tabakalarının yerleştirilmesinden önceki taban zemini hazırlıklarının, şişen zeminler ve dona karşı hassas zeminler gibi özel yer altı koşullarının belirlenmesi ve bunların üstyapı tasarımında göz önünde bulundurulması gerekir.

Rijit üstyapı inşaatlarında temel kaplama çalışmaları için gerekli stabilite ve üniformluğun sağlanabilmesi için üst 300 mm'lik kısımda minimum %6'lık bir CBR'ye sahip olan taban zeminleri önerilir. Bununla birlikte birkaç Avrupa ülkesi daha yüksek bir seviyedeki taban zemini desteğini gerekli kılmıştır. Örneğin; İspanya minimum %10'luk bir CBR'yi gerekli kılmıştır; bu değer altındaki taban zeminleri alınıp uzaklaştırılmalıdır; eğer CBR değeri %10 ile %20 arasında ise bir granüler alt temele ihtiyaç duyulur. Benzer şekilde Almanya 45 MPa'lık minimum bir taban zemini taşıma değerini gerekli kılmıştır (bu değer bir modifiye plak yükleme testi ile elde edilir). Benzer şekilde, Avusturya'da 35 MPa'lık bir minimum taban zemini taşıma değerini ortaya koymuştur; bu değer altındaki taban zeminleri için gereken zemin değişiklikleri veya stabilizasyonlar belirtilmiştir. Zeminin CBR değerini tahmin etmek için kullanılan taban zeminine girebilecek uzun dar bir konik penetrometre (dynamic cone penetrometer–DCP) aynı zamanda yapım kontrolü içinde kullanılabilir. [9, 14]

Sıklıkla doğal olan veya yapay olan dolgular bu nitelikleri göstermekte yetersizdir. Bu durumlarda temelin üstyapı performansı üzerinde etkili olan dayanım ile üniformluğun geliştirilmesi ve iklimsel değişikliklerin etkisinin azaltılması için şu teknikler kullanılabilir.

- a. Zayıf zeminlerin (yüksek derecede plastik veya sıkışabilir zemin) stabilizasyonu
- b. Kalın granüler tabakalar
- c. Yer altı drenaj sistemleri
- d. Geotekstiller
- e. Zemin kapsüllendirmesi

Zemin problemlerinin çözümüne ilişkin bir metot mevcut taban zeminin stabilizasyonudur. Sıklıkla uygulanan stabilize ediciler şunlardır [6]:

- Kireç stabilizasyonu (zeminlerin kireçle reaktif olması gerekir)
- Çimento stabilizasyonu
- Asfalt satbilizasyonu (sadece granüler zeminler)

Stabilize edici katkı maddesinin tipi ağırlıkla taban zeminin tipine göre değişim göstermektedir. Kireçle stabilizasyon; orta boy, kısmen ince ve orta dereceden yüksek dereceye kadar plastisiteye sahip ince taneli zeminler için uygundur. Fakat bu yöntem en çok plastisite indeksinin (PI) 10'dan büyük olduğu ve 200 No.lu elekten %25'nden fazlasının geçtiği zeminler için en uygundur. Çimento stabilizasyonu düşük dereceden kısmen yüksek plastisiye sahip ince taneli ve orta boy-iri taneli zeminler için uygundur. Fakat bu yöntem en çok plastisite indeksinin 30'dan küçük olduğu kumlu zeminler için, plastisite indeksinin 20'den küçük olduğu ve likit limitin (LL-zeminin plastik durumdan sıvı duruma geçtiği andaki su içeriği) 40'tan küçük olduğu ince taneli zeminler için ve $PI > (20 + [50 - \text{ince taneli içerik}])$ olduğu iri taneli zeminler için uygundur. Asfalt stabilizasyonu genellikle düşük plastisitedeki orta ve iri taneli zeminler için uygundur ve 200 no'lu elekten %25'nden daha azının geçtiği, $PI < 6$ olduğu kumlu zeminler için veya $PI < 6$ olduğu 200 no'lu elekten %15'nden daha azının geçtiği iri taneli zeminler için de uygundur.

Taban zeminin hazırlanmasında göz önüne alınması gereken diğer bir kritik durum don kabarmasıdır. Don kabarmasının problem olduğu yerlerde hassas zeminler dona karşı hassas olmayan malzemelerle değiştirilmelidir. Alternatif olarak doğal zemin üzerindeki eğim çizgisinin yükseltilmesini sağlayan dona karşı hassas olmayan bir ek malzeme seçimi zemin problemi üzerinde etkili olabilir. Bir çok kuzey Avrupa ülkesi don kabarmasının kontrolüne yardımcı olması amacıyla taban zemiyle temel arasına kalınlığı 203 mm'den 508 mm'ye kadar değişen granüler tabakalar yerleştirmektedirler. Dondan korunmak için gerekli tabaka kalınlığı genellikle bölgesel penetrasyon derinliğinin $\frac{1}{2}$ 'si ile $\frac{3}{4}$ 'ü arasında alınabilir. Sonuç olarak; zeminlerin yeniden karıştırılması ve yeniden sıkıştırılması desteklik düzeyini artırır ve yerinde malzemenin üniformsuzluğundan kaynaklanan problemlerin azalmasını sağlar.

Don kabarmasına ek olarak şişen (veya kabaran) zeminler diğer bir taban zemini problemini temsil eder. Bu tür zeminler nem içeriği değişim reaksiyonlarıyla hacimde kayda değer değişimler gösterirler. Bu tip zeminler için olası çözümler eski zeminin kaldırılarak yerine daha uygun bir malzemenin yerleştirilmesi, %1-2 su içeriklerinde kompaksiyon ve kireç/çimento ile stabilizasyonudur. Bazı şişen zeminler için daha egzotik iyileştirmelere gerek duyulabilir (örneğin ; membran ile kapsullendirme).

7.2.7.2 Temel/Alt- Temel İnşasının Önemi

Yüksek trafik hacimli karayolu rijit üstyapılarında bazı gerekliliklerin yerine getirilmesi için bir veya daha fazla temel ve alt temel tabakalarından faydalanılır. Temel tabakaları tamamlanmış olan taban zemini üzerine yerleştirilir. Yüksek trafik hacimli bir rijit üstyapıda, temel yapımını gerektiren iki temel unsur şunlardır;

1. Kaplamacılara düzgün bir üstyapının oluşturulması sırasında çalışabilecekleri stabil bir platform oluşturarak beton plak inşasının daha düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımları. Düzgün bir yüzey elde edilebilmesi için temel tabakalarının düzgünlüğüne ihtiyaç duyulur.
2. Rijit plağın aşınmasını ve dayanım kaybını önleyecek üniform bir desteklik sağlar.

Bu bakımdan temel kısmını oluşturan spesifik maddeleri ve doğru kompaksiyonu ve/veya yüksek durabiliteye ulaşılması için gerekli dayanımı kapsayan bir sistemle, yolun eğim boyunca doğru yükseklikte inşa edilmesi gerekir.

Betonun yerleştirilmesinden önce eğimin kontrol edilmesi, uygun şekilde düzeltilmesi gerekir. Eğer eğimlendirme çalışmaları ve inşaat trafiği temelin yoğunluğunu bozuyorsa, bunu düzeltmek için ek kompaksiyona ihtiyaç duyulur

Eğer bir kayar kalıp kaplayıcısı kullanılıyorsa, kayar kalıp paletlerine trafik yolu sağlayabilecek yolun her bir yanından 600 mm daha geniş olan bir temel tabakasının sağlanması önerilmektedir. Kayar kalıp kaplayıcısından dolayı kenar drenlerinin kırılmamasına özel dikkat verilmelidir. Kenar drenleri temel sınırlarının ötesinde veya trafik şeritleri kaplandıktan sonra kurulabilir. [8]

7.2.7.3 Beton Plak Kürünün Önemi

Yüksek trafik hacimli üstyapılar için beton yüzeyin yeterli kürü çok önemlidir. İyi kür işlemleri (beton karışımının uygun kürlenme) yüzeyin gerektiği biçimde sertleşmesini sağlar ve böylelikle milyonlarca tekerlek tarafından (özellikle tekerleklerin çelik saplamalara sahip olduğu karlı ve buzlu alanlarda) daha düşük seviyede aşınma düzeyi görülür. Aşınmaya karşı dayanıklı bir yüzeyin sağlanması için beton karışımının daha düşük bir su/çimento oranına ve yeterli çimento içeriğine sahip olması gerekir. Hüküm süren iklim koşulları altında ölçeklenmelere neden olmayacak veya donma-çözülme etkileri sonucu kabarma etkilerini hafifletecek hava içeriği yeterli seviyede olmalıdır.

Ayrıca su kürü güneşli günler boyunca yapılan inşaatlarda köşe kırılmalarını ve bazı enine, boyuna ve diyagonal çatlakların oranını azaltır. Daha düşük derz ve çatlak açılmaları ile sonuçlanan portland çimentosu betonunun sıfır-gerilme sıcaklığı aynı zamanda daha düşük olacaktır.



Şekil 7.22: Betonun kürü kritiktir. Su kürü inşa sırasındaki yüksek sıcaklık gradientlerini, yüksek sıfır-gerilme sıcaklıklarını ve aşırı rötreyi önler [12]

7.2.7.4 Kayma ve Bağ Donatılarının Yerleşiminin Önemi

Enine kayma donatıları yatay ve düşey sırada uygun şekilde dizilmezlerse derz kilitlenebilir ve bunun sonucu derz yakınında rastgele çatlaklar görülecektir. Bu çatlaklar sıklıkla genişleyecek, ufalanacaktır ve bu da derzin tüm derinlik boyunca ve/veya bitişik plakların yeniden yerleştirilmesini gerektirecektir. Gerekli toleransları

belirleyen mevcut standartlar üzerinde, bu standartları destekleyecek bilgi yetersizliğinden dolayı, bir çok anlaşmazlık vardır. Son zamanlara kadar yerleşimi ölçebilecek bir teknoloji bulunmamaktaydı. MIT Scan teknolojisi kayma ve bağ donatılarının istenilen dikey ve yatay sıraya göre yerleştirilmesini olası hale getirmiştir ve bu teknoloji gelecek birkaç yıl içinde bu standartları değiştirebilecek gibi görünmektedir.

Boyuna derzlerin bir yanından diğer yanına geçen bağ donatıları uygun pozisyonda olmadığı zaman derz zamanla açılabilir. Bunun sonucunda ise motosiklet ve diğer taşıtlar için güvenli olmayan durumlar ortaya çıkabilmektedir. Kayma donatılarında olduğu gibi, bağ donatılarının uygun düzeni hakkında tartışmalar bulunmaktadır. Bir kritere göre kabarmanın önlenmesi için bunların rijit plağın üst sınırına yada alt sınırına 50 mm'den daha yakın olmaması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7.23: Kayma donatıları kabul edilebilir toleranslarla yerleştirilebilir. Günlük saha ölçümleri kritiktir. [12]



Şekil 7.24: Bağ donatılarının yerleşimi oldukça önemlidir ve günlük ölçüm gerektirir. [12]

7.2.7.5 Plak Kesim Derinliğinin ve Zamanının Önemi

Enine derzlerin inşası çatlak oluşumunun kontrol altında tutulabilmesi için plakta yeterli derinlikteki testere kesimini gerektirir. Bununla birlikte maksimum derz kesim hızına ulaşılabilmesi için çatlak oluşumunu kontrol edecek minimum kesme derinliği tercih edilir. Aynı zamanda kayma donatısız derzlerde, agrega kenetlenmesi ile sağlanan daha yüksek bir yük transferinin elde edilebilmesi için kesme derinliğinin sınırlandırılması önerilir.

Geleneksel uygulamalara göre enine derz kesme derinliği plak kalınlığının %25'i ve boyuna derz kesme derinliği plak kalınlığının %33'ü (veya daha derin) kadardır. Çoğunlukla bu derinliklerle iyi bir performans elde edilebiliyorken, temel tabakası tipinin gerekli derz kesme derinliği üzerinde etkisi olabilmektedir. Stabilize temeller plak ile temel arasında daha yüksek düzeydeki sürtünmeyi sağlar ve böylelikle plakta daha büyük çekme gerilmelerine neden olur. Ayrıca geçirimli temeller üzerine yerleştirilen plaklar temel tabakası malzemesinin açık dokusundan dolayı tasarım kalınlığından biraz daha kalındır. Bu yüzden stabilize ve geçirimli temeller üzerine yerleştirilen plaklarda, çatlak oluşumunun kontrol altında tutulabilmesi için gereken enine derz kesim derinliği daha büyük (plak kalınlığının %33'ü) olabilmektedir.

Stabilize temellerin sebep olduğu sürtünme ile ilgili probleme yönelik diğer bir yol; işlenmiş temellerde tavsiye edilen enine derz aralıklarında çatlak oluşumunun kontrol altına alınabilmesi için, işlenmiş temel tabakası yüzeyinin çentilmesidir. Bu

uygulama Almanya'daki çimento ile işlenmiş temellerde alışıl gelmiş bir işlemdir. Almanya'daki şartnamelere göre plak temel üzerine yerleştirildikten sonra plak kalınlığının %30'u kadarki bir kesim işlemi ile derzler oluşturulur.

Derz haznesi için genişletme işleminden önce, derzler 3 mm genişliğinde kesilerek kesme işlemi tamamlanır. Şu anda bazı testere bıçağı üreticileri ilk kesim işlemi ve hazne oluşturmak için yapılan kesim işlemi birlikte yapabilecek bir bıçak üretmektedirler.

Derz kesim işlemlerinde kritik bir bakış açısı ise; bu işlemin doğru bir zamanlama ile yapılmasıdır. Eğer kesme işlemi aşırı erken (örneğin; plağın yeteri kadar priz alması durumunda) kabarıp dökülmeler veya sökülmeler meydana gelebilmektedir. Diğer yandan derz kesimi aşırı geç (plak iç gerilmeleri geliştikten sonra) kontrol dışı çatlaklar gelişecektir. İkinci durum birinci duruma göre daha fazla kaygı vericidir. Kesim işlemine mümkün olduğu kadar çabuk bir süre içinde (genellikle 4 ile 12 saat arasında) başlanması önerilir.

Rasgele çatlak oluşumunun önlenmesi için kesimin yapılabileceği en üst sınır veya en geç süre plaktaki tutucu gerilmelere gelişimine bağlı olarak değişmektedir. Bu tutucu gerilmeler öncelikli olarak tutucu sürtünme gerilmeleri ve termal kıvrılma gerilmeleri sonucu ortaya çıkar. İlk 24 saatlik periyot boyunca, beton plaklar tutucu gerilmelerin gelişimine karşı çok hassastır. Saha gözlemleri ve testleri kesim işleminin yapılabileceği sunan öncelikli göstergenin beton yüzeyi sıcaklığının 8 °C düştüğün an olarak koymuştur. Bu anın belirlenebilmesindeki zorluk ve yüzey sıcaklığının çok hızlı bir şekilde düşebilmesi (öğleden sonraki serinlik, yağmur yağışı, vb.) nedeni ile derzlerdeki kesim işleminin derzlerde kayda değer sökülmenin olmayacağı olabildiğince çabuk bir şekilde uygulanması önerilir. Bu; daha büyük tutucu sürtünme gerilmelerinin gelişebileceği özellikle stabilize temeller üzerine yerleştirilen plaklar için uygundur. Kaplama işleminin geceleri veya sabahın erken saatlerinde (kaplama işleminin sabah saat 10 veya 11'de tamamlanmasıyla) plak boyunca sıcaklık gradiyentlerinin gelişiminin minimize edilmesiyle kesim işlemi için ek bir süre elde edilebilir.

Geçmişte bazı kurumlar atlamalı derz kesim prosedürlerini kullanmışlardır. Bu prosedürde öncelikle her ikinci veya üçüncü derz kesilir. Diğer atlanmış olan derzler daha sonra kesilir. Bu prosedür genellikle kaplama işleminin hızlandırılması amacıyla yapılmaktadır. Fakat bu uygulama atlanan derzlerde veya yakınlarında

özellikle stabilize temel üzerine yerleştirilen plaklarda enince çatlakların gelişmesine neden olur. Aynı zamanda; ilk kesilen derzlerin tipik olarak daha geniş olması nedeniyle uniform olmayan derz hareketleri ve derz dolgu malzemelerinin değişken performansları ortaya çıkar.

Derzli-donatısız tipteki rijit üstyapı derzlerinde dolgu malzemesi ihtiyacı şüphelidir ve Kuzey Amerika'daki bazı karayolu kurumları derzlerde dolgu malzemesi kullanmamaktadır. Derzlerin doldurulmamasıyla, derzlerin çok dar olarak kesilebilmesi şansı avantajlıdır. Şili'de enine derz kesimlerinde 2 mm'lik bir testere bıçağı büyük bir başarı ile (örneğin; düşük gürültü düzeyi) kullanılmaktadır.

7.2.7.6 Üstyapı Düzgünlüğünün Önemi

Saha çalışmaları kesin bir şekilde göstermiştir ki daha düzgün inşa edilen üstyapılar tasarım ömrü boyunca daha düzgün kalacaktır ve bunlar kabaca yapılanlardan daha uzun ömürlü olacaktır. Bu bulgunun birkaç sebebi vardır :

- İlk düzgünlük, ancak taban zemininden üniform beton üretimine kadar bütün tabakaların kaliteli inşasıyla mümkündür (dikkatli ip şerit ve eğim kontrolü).
- İlk düzgünlük beton tesliminde gecikmelerin olmadığı üniform hareket eden bir yapım sürecini gerektirir.
- Müteahhidin düzgün bir üstyapı elde edebilmesi için inşa süresi boyunca her açıdan daha dikkatli olması gerekmektedir (kaplayıcının düzgün şekilde ilerleyişi, betonun doğru konsolidasyonu uygun dahili vibratörleme, tam vaktinde dokulandırma, kütleme ve derz kesimi).

Uluslararası pürüzlülük indeksi (the international roughness index – IRI) son yıllarda üstyapı pürüzlülüğünün tanımlanmasında standart hale gelmiştir. Khazanovich; 63 m/km (40 in / mi) den küçük olan ilk IRI değerlerinin iyi seviyedeki ilk düzgünlüğü temsil ettiğini belirtmiştir (*Common Characteristics of Good and Poorly Performing PCC Pavements*. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1997). Bununla beraber, kaplama teknolojilerindeki gelişmeler ve düzgünlük şartnamelerinin kullanımı sonucunda daha düşük pürüzlülük seviyeleri elde edilebilmiştir.

Düzgünlük şartnameleri, güçlü bir güdü ile ağırlıkla önerilmektedir. Amerika'daki müteahhitler bunun için %8'lik ekstra ödenek alabilmektedirler. Bu kaplama işlemlerinin iyileştirilmesine ve gelecekte uzun bir süre için karayolu kullanıcılarına

hizmet edebilecek düzgün üstyapı yüzeylerinin elde edilmesini sağlar. Avrupa şartnameleri müteahhitlere önerilen primlerden yoksundur. Garanti kullanımı Avrupa'da Amerika'ya göre çok daha yaygındır.

Düzgün bir rijit üstyapının inşasını şu faktörler etkilemektedir:

- **Portland Çimentosu Betonu Malzemesi ve Karışım Tasarımı:** Karışım tasarımı çalışabilirliği (işlenebilirliği) ve dayanımı tehlikeye atmadan tamamlama kolaylığını sağlayacak şekilde optimize edilmelidir. Müteahhit tarafından üretilen karışım üniform ve karışım tasarımına uygun olmalıdır. Bu koşullara uymayan karışım üstyapı davranışı üzerindeki hidrolik kuvvetleri değiştirecektir ve son üstyapı profili farklı olacaktır.

- **Eğim Kontrolü:** Düzgün bir üstyapı sıkı bir eğim kontrolü olmadan inşa edilemez. Taban zemininin hazırlanmasından son üstyapı profilinin sağlandığı tamamlama safhasına kadar üstyapı inşasının her bölümünde eğim kontrolünün yerine getirilmesi gerekir. Aplikasyon kazıkları ve ip şerit yardımıyla, eğimler incelenmelidir. İki ip şerit kullanılabilir. Aralarındaki uzaklığın 8 m'yi geçmediği, kablo tipinde ip şeritlerle inşa tercih edilir. Düzgün bir geçişin sağlanabilmesi için ip şeritlerin başladığı ve bittiği alanlara özel bir dikkat verilmelidir. İp şeritler inşaat süresince gözlemlenmeli ve bakımı yapılmalıdır. İp şeritlerin ve aplikasyon kazıklarının yeri kasıtlı olmadan şunlardan dolayı değişebilir :

- İp şeritlerin üzerinde yabancı bir nesne bulunması
- İşçilerin geçerken bu elemanlara çarpması
- Portland çimentosu betonu döküm işlemleri

Eğer böyle bir olay meydana gelirse inceleme aygıtları kullanılarak ip şeritler ve aplikasyon kazıkları yeniden kurulmalıdır. Sadece görsel bir denetim yetersiz olabilmektedir.

- **Kaplama Hızı ve Malzeme Dağıtım Oranı:** Kaplama çalışma hızının, portland çimentosu betonunun dağıtımı (teslimi) ile uyumlu olması çok önemlidir. Kaplama sürecindeki sabit bir hızın elde edilmesi, plastik kıvamdaki portland çimentosu betonunun üzerinde rol oynayan hidrolik kuvvetlerin değişimini azaltır. Kaplama süreci boyunca, kaplayıcının duruş sayısı kesinlikle minimuma indirilmelidir. Plastik kıvamdaki beton teslimindeki aksamalar, kaplayıcının

yavaşlamasına veya durmasına neden olacaktır. Plastik betonun aşırı stoklanması farklı seviyede beton çalışılabilirliği (işlenebilirliği) yaratabilmektedir. Her iki durumda da kaplama ve tamamlama süreçleri tehlikeye atılmış olacaktır.

- **Kaplayıcının Önündeki Beton Başlık:** Portland çimentosu betonunun, temelin bir yanından bir yanına, üniform olarak serilmesi ve plastik beton yığınlarının (tümseklerinin) oluşmasının önlenmesi oldukça önemlidir. Kaplayıcının altında rol oynayan hidrolik kuvvetlerdeki değişimin önüne geçilebilmesi için master çubuğunun üzerinde sabit bir başlık (kafa) tutulmalıdır.
- **Gömülmüş Donatılar:** Kayma donatıları (dowel bars), bağ donatıları (tie bars) ve takviye donatısı düzgün bir üstyapının üretiminde yapım zorlukları yaratmaktadır. Kaplayıcının arkasından portland çimentosu betonunun geçirilmesi sırasında uygun bir basıncın uygulanması önemlidir. Aşırı düşük basınç donatı etrafındaki betonun konsolidasyonunu önleyebilecekken, aşırı yüksek basınç bunların oturmasına veya donatının geri tepmesini izleyen bu nesnelerin aşağıya doğru hareketine neden olur ve bunun sonucunda üstyapıda sırasıyla eğimlere (dalımlara) veya şişliklere (çıkıntılara) sebep olur. Aynı zamanda gömülmüş donatıyla vibratör arasındaki temasın önlenmesi de çok önemlidir.
- **Teçhizat Bakımı:** Teçhizatların iyi bakılmış halde ve temiz tutularak kaplama sırasındaki duraklamaların minimum seviyede tutulması büyük önem taşımaktadır.
- **Eğitilmiş İş Gücü:** Tüm ekip elemanlarının kaplama sürecindeki rollerini bilmesi ve anlaması gerekir ve yapacakları hareketlerin üstyapı düzgünlüğü üzerinde etkili olacağını göz önünde bulundurmalarıdır.

Son olarak Amerika’da geçmiş 20 yılı aşkın bir süre içinde, müteahhidin teşvik edilip edilmemesinin düzgün üstyapılar elde edilmesinde temel bir etkisinin olduğu bulunmuştur. Düzgün üstyapılar inşa eden müteahhitlere sözleşme bedelinin %8’ne kadar olan bir fiyat ödenmektedir. Bu kaplama çalışmalarında devrim yaratmıştır ve karayolu kullanıcılarına daha konforlu, daha uzun ömürlü olan üstyapıların sunulmasına olanak tanımıştır.



Şekil 7.25: Kaliteli inşa süreci oldukça önemlidir ve müteahhitlere ödenen teşvik primi bu konuda yardımcı olmaktadır. [12]

7.2.8 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapılarının Tasarımında Kritik Noktalar

Rasyonel bir üstyapı tasarımında yol taban zemininin, iklimin, trafik yükünün, malzeme gibi birçok tasarım elemanın ve bunların üstyapı performansı ile ömür-döngü maliyetleri üzerindeki belirleyici niteliklerin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Tasarım sürecinin amacı planlanmış tasarım ömrü boyunca kabul edilebilir performans ve ekonomi sağlayacak üstyapının yapısal anahtar bakış açılarının belirlenebilmesidir. Rijit üstyapı tasarımı kalınlık saptamasından çok daha fazlasını gerektirir. Diğer tasarım yönleri de kalınlık saptanması kadar önem taşır. Bir bölgeye ait verilen koşulların kombinasyonu için (taban zemini koşulları, iklim ve trafik yükü vb.) tasarımın amacı; belirli bir bölgedeki gereklilikleri karşılayacak minimum maliyet ile üstyapının ve bununla ilgili tasarım niteliklerinin saptanmasıdır. [12]

7.2.8.1 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapıların Tasarımındaki En İyi Yaklaşım

Maksimum güvenilirlikteki olası tasarımların elde edilebilmesi için yüksek trafik hacimli rijit üstyapıların mekanistik temelli (veya mühendislik) prensiplere dayanan tasarım prosedürlerine göre dizayn edilmesi önerilmektedir. AASTHO prosedürü gibi ampirik prosedürler yüksek trafik hacimleri aşırı sınırlamalar getirmiştir. Bunların kullanımı ile hareket serbestliğinin sınırlı olması nedeni ile yetersiz

sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Ampirik tasarım prosedürleri negatif karakteristiklere sahip, genellikle şu tipteki tasarımların ortaya çıkmasına neden olur:

- Plak kalınlıkları aşırı muhafazakardır (diğer faktörler daha önemli olduğunda plak kalınlığı ile ilgili bölüme gereğinden fazla yer verilmiş olur).
- Yük aktarım gereksinimleri, derz aralık gereksinimleri temel tabakasında ortaya çıkabilecek problemlerle ilgili konular gibi, belirleyici tasarım niteliklerinin etkileri gözden kaçırılır.

7.2.8.2 Mekanistik–Ampirik Tasarım Prosedürlerinin Avantajları

Bir mühendislik bakışı açısından üstyapı tasarımında bir mekanistik–ampirik yaklaşım çok daha tercih edilebilir seçenektir. Mekanistik; bir rasyonel tasarım süreci ile sonuçlanan mühendislik mekaniği prensibine göre yapılan uygulamalara karşılık gelir. Yoder ve Witczak herhangi bir tasarım prosedürünün tamamı ile rasyonel olması gerektiğini işaret etmişlerdir ve 3 ögenin tamamı ile göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamışlardır: Varsayılan kırılma ve aşırı gerilmeler sonucu oluşan bozulma parametrelerinin önceden tahmin edilmesi için kullanılan teori, malzeme özelliklerinin seçilen teoriye uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi ve istenen performans düzeyinde etkili olan parametrelerin büyüklüğü arasındaki ilişkinin saptanması.

Daha sonra üstyapı performansı ile (belirli bozulmalar) ampirik ilişkisi olan mekanistik–ampirik tasarım prosedürleri; üstyapı tepkileri (gerilmeler ve defleksiyonlar) üzerindeki saha koşullarının, tasarım özelliklerinin ve malzemedeki varyasyonların etkisinin değerlendirilmesine olanak tanır.

Birkaç mekanistik–ampirik tasarım prosedürü bugün bir tasarımcı için mevcuttur. The Portland Cement Association (PCA) ve İlionist Department Of Transportation tasarım prosedürleri ABD’nde en geleneksel olanlarıdır. Bu prosedürler, ne yazık ki, portland çimentosu betonunun kalınlığının tasarımı ile sınırlıdır ve güvenilir bir tasarım, kalınlık tasarımından çok daha fazlasını gerektirmektedir.

ABD’de 1998 yılından beri daha önemli bir yeni ampirik–mekanistik tasarım prosedürü geliştirilmektedir. Bu prosedürün gelecekte yeni bir AASHTO prosedürü haline gelmesi beklenmektedir ve derzli donatısız tipteki ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımından temel olacağı umulmaktadır. Bu prosedür “NCHRP

Project 1-37 A” adı altında geliştirilmiş ve 2004’ün ortalarında tamamlanmıştır (8. Bölüm). Bu prosedür mekanistik-ampirik tasarım sürecini her açıdan geliştirmiştir (yapısal modelleme, malzeme karakterizasyonu ve bozulmaların önceden tahmin edilebilmesi). Yeni tasarım prosedürünün diğer mekanik-ampirik prosedürlerden temel farkı; bu prosedürün sadece bir kalınlık tasarım prosedürü olmayıp çok yönlü bir üstyapı tasarım sistemi aracı olmasıdır. Bu prosedür kuzey Amerika dolaylarındaki yüksek trafik hacimli üstyapılar kullanılarak saha performanslarına göre kalibre edilmiştir.

7.2.8.3 Tasarımda Göz Önünde Bulundurulması Gereken Kritik Saha Koşulları

Her bir üstyapı projesi için farklı olan saha koşullarının bir üstyapının tasarım gereklilikleri üzerinde etkisi vardır. Tasarımcı bir proje için kendisine verilen bir takım saha koşulları ile tasarıma başlar. Bunlar öncelikle trafik, iklim ve taban zeminini kapsar. Beton takviye tabakası tasarımında saha koşulları aynı zamanda mevcut üstyapıyı da içerir. Geometrik elemanlar (kurplar ve viyadükler, şeritlerin genişliği, geçişler, banketler, vb.) üstyapı ve drenaj tasarımını genellikle etkileyen diğer önemli saha koşullarını temsil eder. Bunlar tasarımcı tarafından kontrol edilemezler; fakat, bunların üstyapı tasarımında etkisi olduğu yerlerde tasarımcının bunu direkt olarak göz önünde bulundurması gerekir. Rijit üstyapının performansı üzerinde trafiğin, iklimin, taban zemininin ve mevcut üstyapının etkisi aşağıda açıklanmıştır.

7.2.8.4 Rijit Üstyapıların Performansı Üzerinde Ağır Trafiğin Etkileri

Tekrarlı trafik yükleri; rijit plakların alt ve üst kısımlarında, plakta yorulma çatlaklarının başlaması ve yayılması ile sonuçlanan çekme gerilmelerine (termal ve nem kombinasyonlarıyla beraber) neden olur. Bu çatlaklar sonunda plakta kırılmalar ve bozulmalar olabilir ve bunun sonunda çatlak bozuklukları, çatlak kabarmaları ve pürüzlülükte artış gözlemlenir. Bununla birlikte yeterli kalınlığın, derz aralıklarının ve dayanımın sağlanması ile yorulma zararı elimine edilebilir. Tekrarlı trafik yükleri aynı zamanda derzlerde, desteklenmemiş (mesnetsiz) plak sınırlarında ve köşelerinde, derz bozukluklarında ve köşe kırılmalarında ciddi faktörler olan pompaj etkisine ve plağın altından erozyonla sonuçlanan geniş defleksiyonlara neden olurlar. Kayma donatılarının, plak kürünün, plak kalınlık ve genişliğinin sağlanması ile defleksiyon problemleri giderilebilir.

7.2.8.5 Rijit Üstyapıların Performansı Üzerinde İklimin Etkileri

İklimsel saha koşulları üstyapıda kayda değer gerilmelere, defleksiyonlara ve deformasyonlara neden olan nem ve sıcaklık değişimlerini kapsar. Örneğin, sıcaklık ve nem eğrileri; kayda değer oranda plak çatlamları ile sonuçlanan, plakta kıvrılmalara ve eğilme gerilmelerine neden olabilirler. Bu çatlamlar sadece nem ve sıcaklık etkisi ile meydana geldiği gibi bu etkilerin yük gerilmeleri ile birleşimi ile de meydana gelebilir. Bunlar tasarımda derz aralıklarının kısa tutulması ile ve dökümden sonra uygun kür koşullarının sağlanması ile sınırlandırılmalıdır.

Donma-çözülme döngüsü yetersiz hava boşluk sisteminin mevcut olmaması durumunda betonun dayanımında kayıplara ve kabarmalara neden olabilir. Buzlanmayı önleyici tuzlar, kayma ve bağ donatılarının korozyonuna yol açar. Dona karşı hassas zeminlerde derin don penetrasyonu diferansiyel don şişmelerine yol açabilir. Plakların ve temellerin altındaki aşırı nem; bozulmalara ve gerilme ile çatlamların artışına sebep olan pompaj ve erozyona neden olur. [20]

7.2.8.6 Rijit Üstyapıların Performansı Üzerinde Taban Zemininin Etkileri

Taban zemininin desteklik derecesi hem trafik yükü hem de çevresel kuvvetlerden kaynaklanan plak gerilmelerinin büyüklüğüne etki eder. Taban zemininin destekliği arttığında yük gerilmelerinin azaldığı ancak termal kıvrılma ve nemsal eğilme gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca taban zemininin destekliğinin artması ile, kıvrılma gerilmeleri buna tekabül eden uygun yük azalma oranından daha hızlı bir oranda artmaktadır (bu statik K 'nın 27 kPa/mm'den küçük olduğu çok yumuşak taban zeminlerinin dışındakiler için doğrudur). Çok rijit taban zeminleri için kıvrılma gerilmelerinin artan " K " değeri ile artış gösterdiği bir nokta vardır. Bununla birlikte tipik tasarım koşulları altında, kıvrılma gerilmeleri maksimum değere ulaştığında genellikle çok düşüktür. Bu yüzden derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar (daha kısa derz aralıkları gerektirir.) için çok rijit bir taban zemini arzu edilmez, fakat rijit bir taban zemininin enine çatlaklardaki defleksiyonları azaltmasına bağlı yararlı etkisi sebebi ile sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için daha çok arzu edilir.

Taban zemininin tipi de tasarımda önemli bir faktördür. İri taneli taban zeminleri ince taneli malzemelere göre üstyapının alt drenajı için daha elverişlidirler ve nem ile termal etkilere karşı daha az hassasiyet gösterirler. Bununla ilişkili bir taban zemini etkisi ise üstyapı kesiminin bir yarma veya dolgu kesimi içinde olup olmadığıdır; bir

yarma alanı bir dolgu alanı kadar iyi drenaja sahip olmayabilir. Aynı zamanda yarma ile dolgu arasındaki geçişler sıklıkla şişmeye ve pürüzlülüğe neden olan oturmalara neden olur. Bu yüzden de, bu alanlardaki taban zeminleri özel dikkat gerektirir. Rijit üstyapıların tasarımında genellikle kullanılan bazı tipik zeminlerin değerleri Tablo 7.11’de görülmektedir.

7.2.8.7 Rijit Üstyapıların Tasarımı Üzerinde Mevcut Üstyapının Etkileri

Mevcut üstyapı; takviye tabakasının tasarımı ve aynı zamanda performansı üzerinde etkili olan ana faktördür;

- Mevcut yapı, derzli donatısız tipteki ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımına ve koşullarına göre değişecek şekilde gerilmeleri etkiler.
- Mevcut üstyapının üniformluğu takviye tabakasında oluşabilecek yansıma çatlaklarını etkiler.
- Durabilite, rijit takviye tabakasının ömrünü etkiler.

Tasarım mühendisi rijit takviye tabakasını değerlendirmeli ve özelliklerini saptamalıdır.

Tablo 7.11: Rijit üstyapıların tasarımında genellikle kullanılan bazı tipik zeminlerin değerleri [12]

AASHTO Sınıfı	Tanımlama	Birleştirilmiş Sınıf	Kuru Yoğunluk (lb/ft ³)	CBR (Yüzde)	k Değeri (psi/in)
Kaba Daneli Zeminler					
A-1-a, sürekli dane dağılımlı	Çakıl	GW, GP	125 - 140	60 - 80	300 - 450
A-1-a, kötü derecelenmiş			120 - 130	35 - 60	300 - 400
A-1-b	iri daneli kum	SW	110 - 130	20 - 40	200 - 400
A-3	ince kum	SP	105 - 120	15 - 25	150 - 300
A-2 Tipi Zeminler (ince kumlu granüler malzemeler)					
A-2-4, çakıllı	siltli çakıl	GM	130 - 145	40 - 80	300 - 500
A-2-5, çakıllı	siltli kumlu çakıl				
A-2-4, kumlu	siltli kum	SM	120 - 135	20 - 40	300 - 400
A-2-5, kumlu	siltli kumlu çakıl				
A-2-6, çakıllı	kıllı çakıl	GC	120 - 140	20 - 40	200 - 450
A-2-7, çakıllı	kıllı kumlu çakıl				
A-2-6, kumlu	kıllı kum	SC	105 - 130	10 - 20	150 - 350
A-2-7, kumlu	kıllı çakıllı kum				
İnce Daneli Zeminler					
A-4	Silt	ML, OL	90 - 105	4 - 8	25 - 165 *
	silt/kum çakıl karışımı		100 - 125	5 - 15	40 - 220 *
A-5	kötü derecelenmiş silt	MH	80 - 100	4 - 8	25 - 190 *
A-6	plastik kil	CL	100 - 125	5 - 15	25 - 255 *
A-7-5	orta derecede plastik elastik kil	CL, OL	90 - 125	4 - 15	25 - 215 *
A-7-6	yüksek derecede plastik elastik kil	CH, OH	80 - 110	3 - 5	40 - 220 *

*İnce taneli zeminlerin k-değeri doygunluk düzeyine bağlı olarak oldukça büyük değişim gösterir.

1lb/ft³=16.018 kg/m³, 1 psi/in=0.271 kPa/mm



Şekil 7.26: Beton takviye tabakaları herhangi bir tipteki mevcut üstyapı üzerine yerleştirilebilirler fakat tasarımda mevcut üstyapının tasarımı ve durumu göz önünde bulundurulmalıdır [12]

7.2.8.8 Rijit Üstyapıların Tasarımı Üzerinde Plak Kalınlığının Etkileri

Diğer tasarım özellikleri ile birlikte plak kalınlığı, yorulma hasarına ve çatlaklarına karşı yeterli olmalıdır. Bununla birlikte; verilmiş olan bir takım saha koşulları, derz aralıkları ve portland çimentosu betonunun dayanım ve modülleri için plak çatlaklarının meydana gelmeyeceği bir kalınlık mevcuttur ve bunun daha da artırılmasının bir yararı yoktur. Mekanistik temelli tasarım prosedürleri ile bu kalınlık tespit edilebilmektedir.

7.2.8.9 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapıların Yüksek Dayanımlı Olması Gerekliği

Yüksek trafik hacimli rijit üstyapıların olağanüstü yüksek dayanıma sahip olmaları gerekmez. Bununla birlikte birçok rijit üst yapının ağır trafik altında iyi performans göstermesinin sebebi ortalamanın üzerinde bir dayanıma sahip olmalarıdır. Bu bakımdan, dayanımın tipik değerden daha yüksek olması önerilir. Fakat, olağanüstü yüksek bir dayanıma sahip olma zorunluluğu yoktur. Genellikle, 28 günlük basınç dayanımının 35 MPa'dan büyük olması ve eğilme dayanımının 5 MPa'dan büyük olması önerilir.

7.2.8.10 Derzli Donatısız Tipteki Bir Rijit Üstyapı Projesi İçin Enine Derz Tasarımının Önemi

Enine derz tasarımı, üstyapı performansı üzerinde çok kritik bir yer tutan konudur. Genellikle, standart enine derz çizimleri yeterli değildir. Enine derzler; büzülme, sıcaklık ve nem gradientleri ile temel tabakasından gelen sürtünme baskısı sebebiyle oluşan dahili plak gerilmelerinin hafifletilebilmesi için, derzli donatısız tipteki üstyapılarda uygulanırlar. Bu gerilmelerin tümü plakta rasgele, kontrol dışı çatlamalara neden olabilirler. Enine derzler, bir zorunlulukken ve rijit üstyapı tasarımı ile inşasının ayrılmaz bir parçası olduğu halde; enine derzlerin tasarımı, inşası ve performansı ile ilgili birçok problem bulunmaktadır.

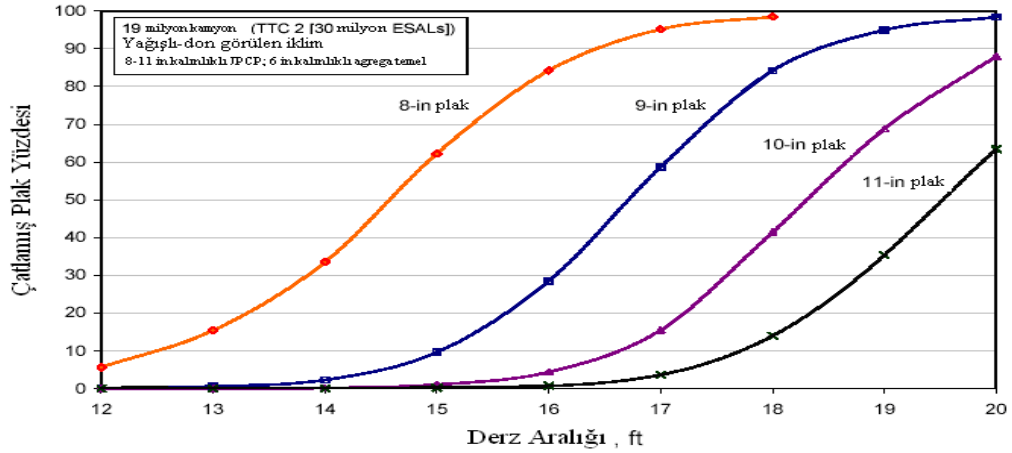
Geçmişteki birçok rijit üstyapının performansı yapısal kapasitesinden çok derz tasarımına göre değerlendirilmiştir. Aşırı derz aralığı ve yetersiz derz yük transfer tasarımı, birçok derzli rijit üstyapının performansını zayıflatan kritik derz tasarım faktörlerinin örnekleridir.

Enine derz tasarımı; derz aralığı, testere ile kesim derinliği, derz yönlendirmesi, yük transferi, ve derz dolgusu gibi farklı birçok tasarım unsurunu içermektedir. Etkili bir derz tasarımı; derzli bir rijit üstyapının uzun süreli performans kapasitesinin sağlanması için ihtiyaç duyulan bu unsurların her birine hitap etmektedir. Bu faktörlerden her biri aşağıda incelenmiştir:

7.2.8.11 Enine Derz Aralığı

Enine derz aralığı, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yapısal ve fonksiyonel performansı ile birlikte yapım ve bakım maliyetlerine de etki eden kritik bir tasarım faktörüdür. Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılarda; aşırı büzülme dolayısıyla oluşabilecek rasgele çatlakların ve uygun derzlerin sağlanmadığı durumlarda ortaya çıkan eğilme gerilmelerinin kontrol altına alınabilmesi için enine derzlere ihtiyaç duyulur. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardaki gerilmeler derz aralığının artması ile hızla artar. Aynı zamanda, derz aralığının artması ile daha düşük seviyedeki derz kusurları da artış gösterir. Derz aralığı, plak kalınlığı, plak genişliği, portland çimentosu malzemesi özellikleri, temel tipi ve taban rijitliği gibi tasarım özelliklerinin bu bağlam için de seçilmesi gerekir. Ayrıca, güneşin etkisi ile meydana gelen radyasyon etkisinin olduğu daha kuru iklimlerde oluşan yüksek sıcaklık gradienti daha kısa derz aralığını gerektirir. Belirli bir derz aralığı, verilmiş olan

birtakım tasarım koşulları için yeterli olabilirken başka koşullar için yetersiz kalabilmektedir. Plak kalınlığı ile derz aralığı arasındaki etkileşim Şekil 7.27’de görülmektedir.



Açıklayıcı Bilgiler

1 in = 25.4 mm

1 ft = 0.3 m

JPCP: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı

Şekil 7.27: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların plak kalınlığına ve derz aralığına bağlı olarak değişimi (iki durum da oldukça kritiktir) [12]

Genelde, kısa derz aralıkları (örneğin; 4.5 m) önerilir. Sıcak-güneşli hava, kuru iklim gibi kritik durum arz eden koşullarda inşa edilen üstyapılar için 4 m’lik bir derz aralığı tavsiye edilir. Daha kalın plaklar için (>275 mm), serin hava veya geceleri yapılan inşa uygulamaları, işlenmemiş agrega temel tabakaları için ve kabul edilebilir performansın mevcut performans veya bir yorulma analizi ile kanıtlanabildiği durumlarda daha uzun derz aralıkları (5,5 m’ye kadar) göz önünde tutulabilir.

• Enine Derzlerin Doğrultusu

Derz yönlendirmesi; enine derzin üstyapının merkez hattı ile yaptığı açıya karşılık gelir. Dikey olan derzler merkez hattına dik olarak inşa edilirken vev derzler merkez hattı ile saat yelkovanının tersi yönündeki doğrultuda her 3,7 m’de yaklaşık olarak 0,6 m’ye denk gelen bir açıyla yerleştirilirler. Enine derzlerin vevlendirilmesindeki amaç bir dingildeki tekerleklerin derz üzerinden aynı anda geçişini engelleyerek derz boyunca potansiyel defleksiyon ile pürüzlülüğün ve derz eksikliklerinden kaynaklanan gürültü düzeyinin azaltılmasıdır.

Vevlendirilmiş derzlerin kullanımı kayma donatısız plaklar için göz önünde bulundurulabilir (bu düşük ile orta seviyedeki trafik için dizayn edilen üstyapılara

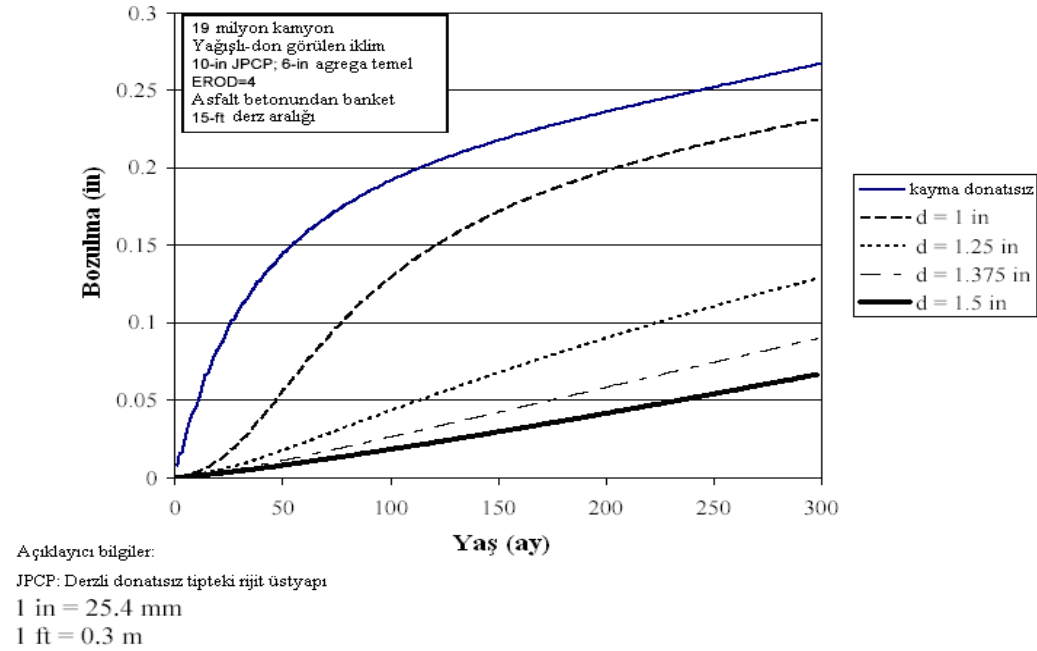
karşılık gelir). Bu tür tasarımlarda, verevlendirilmiş derzlerin dikey derzlere göre daha az kusur gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte; derzlerin verevlendirilmesi köşe çatlaklarının ve enine çatlaklarının gelişim potansiyelini artırmaktadır. Eğer derzlerde kayma donatıları kullanılacak olursa; eksiklerin uygun kayma donatısı tasarımı ile önlenecek olmasından ve inşa zorlukları ile çatlama potansiyelindeki artış nedeni ile verevlendirilmiş derzler önerilmez. Ayrıca kayma donatılarının aynı hizaya getirilmesini ilişkin problemlerin ortaya çıkması verevlendirilmiş derz tasarımlarında daha olasıdır.

7.2.8.12 Kayma Donatısı Çapı ve Kayma Donatısı Aralığının Tasarım Süreci İçinde Belirlenmesi

Yük transferi; derz yüzlerinin birleşme yerlerindeki birbirlerine kenetlenmiş durumda olan agregaların, mekanik yük transfer araçlarının (örneğin; kayma donatıları) kullanımı ve temel tabakası aracılığı ile tekerlek yüklerinin bir plaktan sonraki plağa iletimini sağlayan mekanizmadır. Enine derzlerdeki zayıf yük transferi; pompajın ve derz kusurlarının ortaya çıkmasına katkıda bulunur. Derz kusurları ile “Uluslararası Pürüzlülük İndeksi (International Roughness Index-IRI)” ve sürüş kalitesi arasında güçlü bir karşılıklı ilişki vardır ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda pürüzlülüğe etki eden en önemli faktörlerden birisidir.

Kayma donatıları, kayda değer kamyon trafiğinin olduğu yüksek trafik hacimli yollarda her zaman kullanılmalıdır. Kayma donatıları komşu olan rijit plaklar arasında yük transfer karakteristiklerini oldukça büyük oranda geliştirmektedir. Kayma donatılarının varlığı, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz kusurlarının ortaya çıkmasına etki eden en önemli tasarım konusu olarak kabul edilmiştir. Hem kayma donatılarının kullanımı hem de kayma donatılarının yarı çapı, derz kusurlarının minimuma indirilmesindeki en önemli etkidir. Kayma donatılarının her türlü trafik düzeyinde gerekli olmasının yanında kayma donatılarının yerleşiminin derz kusurlarının kontrolü üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Yağışlı ve soğuk havalarda görüldüğü kritik iklimlerde (derz kusurları daha çok görülür) kayma donatılarının kullanımı; aşınabilir temellerin, düşük sıcaklıkların ve nem artışının etkilerini boşa çıkartır. Aksi halde erozyon, ince taneli malzemelerin pompajı, derzlerin açılması gözlemlenir.

Kayma donatılı üstyapılar için, kayma donatısı yarı çapı ve kayma donatısı aralığı kritik tasarım girdileridir. Daha büyük kayma donatısı çapı; daha düşük beton taşıma gerilmesi ve derz kusurları manasına gelmektedir. Derzli donatısız tipteki üstyapılarda derz kusurları kayma donatısının çapına oldukça duyarlıdır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz kusurlarının kayma donatısının çapına olan duyarlılığı Şekil 7.28’de gösterilmiştir. Derz kusurları kayma donatısının çapı 38 mm civarında iken çoğunlukla düşük seviyededir. Daha küçük çaptaki kayma donatılarının kullanıldığı derzlerde derz kusurları artış gösterir. Belirli saha koşullarına ve tasarım özelliklerine göre bu kusurların sınırlandırılmasını sağlayabilecek kayma donatılarının ve bunların çapının elde edilmesinde yardımcı olan tahmin modelleri mevcuttur.



Şekil 7.28: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının kayma donatısına bağlı olarak değişimi [12]

7.2.8.13 Şeritler Arasındaki Maksimum Boyuna Derz Aralığı

Şeritler arasındaki maksimum boyuna derz aralığı için tespit edilmiş belirli bir mesafe bulunmamaktadır fakat deneyimler göstermiştir ki genişliği 3,7 m olan ve kalınlığı 150 mm ile 300 mm arasında değişen herhangi bir plakta boyuna çatlaklar gözlenmemiştir. $3,7 + 0,5 = 4,2$ m’lik genişletilmiş plaklarda da boyuna çatlaklar aşırı olmamakla birlikte boyuna çatlaklarda artış gözlemlenmemiştir. Deneyimlere göre 4,2 m’den daha geniş olan şeritlerde bükülme ve çarpımalardan dolayı boyuna

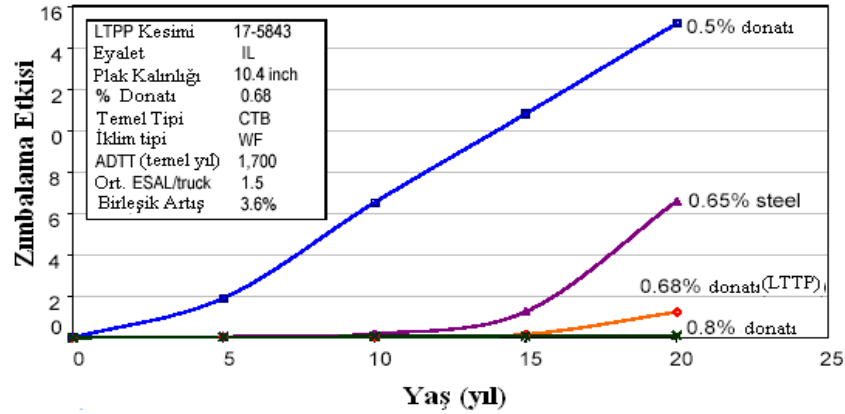
çatlaklar gözlemlenecektir. Bu yüzden 4,2 m'den daha geniş olan karayollarında genellikle kullanılan tipik kalınlıktaki plaklarda bir ekstra boyuna derzin kullanımı önerilmektedir.

7.2.8.14 Trafik Şeritlerinin ve Banketlerinin Birlikte Bağlanması

Bu konu rijit üstyapıların tasarımına ilişkin en çok sorulan sorulardan biridir ve kesin bir cevap bulunmamakla birlikte şu ana kadar bu konuda bir araştırma yapılmamıştır. Uzmanların çoğu iki veya üç trafik şeridi ile bir banketin bağ donatıları ile birlikte bağlanabileceği maksimum genişliğin 11 m olduğunu ortaya koymuşlardır. Fakat betonun genleşme katsayısı, rijit plağın katılaştığı sıcaklık, kürün yeterliliği, temel ile plak arasındaki sürtünme ve buna benzer birçok faktör bu yanıtı etki etmektedir. Ancak şeritlerin birbirine yakın bir şekilde beraberce tutulabilmesi için oldukça fazla ihtiyaç duyulan bir güvenlik faktörü sağlanmalıdır. Eğer şeritler ayrılırsa çözümü olmayan ciddi bir güvenlik problemi ortaya çıkar. [22]

7.2.8.15 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar İçin İhtiyaç Duyulan Donatı Miktarı

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için anahtar tasarım özelliği boyuna donatılardır. Boyuna donatı arttıkça enine büzülme (rötre) çatlaklarının genişliği azalmaktadır. Bu genişlik oldukça kritiktir ve üstyapının ömrü boyunca yüzeydeki genişliğinin hiçbir zaman 0,5 mm'yi aşmaması gerekir. Bununla birlikte çatlak aralıkları da azalmaktadır. Fakat sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarla ilgili elde edilen birçok deneyim kısa çatlak aralıkları ile (örneğin 1 m veya daha az) olağanüstü iyi bir performansın elde edilebileceğinin göstermiştir. Çatlak aralıklarının 1 m'den daha fazla olması ile ilgili sınırlama düşüncesi 1 m'den daha kısa çatlak aralığına sahip olan ve buna karşın çok iyi performans gösteren sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların varlığı ile geçerliliğini yitirmiştir. Anahtar faktör çatlak genişliğidir ve bunun çok dar şekilde bulunmasıdır. Artırılmış donatıyı temsil eden Şekil 7.29'daki alt çizgi zımbalama etkisinin (punchout) azalması ile sonuçlanmıştır. Boyuna donatı içeriği için genel öneri; plak enkesit alanının % 0,7'den %0,8'ine kadardır.



Şekil 7.29: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda donatı içeriğinin yapısal performansa olan etkisi (uygulamaların çoğunluğunda % 0.7- 0.8 önerilmiştir) [12]

Donatının derinliği de aynı zamanda kritik bir durum oluşturmaktadır. Yüzeye daha yakın olan bir donatı, daha dar enine çatlak anlamına gelir. Ancak donatının yüzeye aşırı yakın olması problemlere neden olur. Hiçbir koşul altında donatının, plak yarı derinliğinin aşağısında olmaması gerekir. Illinois’de, plak kalınlığına bakılmaksızın donatının plağın üst noktasından yaklaşık olarak 90 mm aşağı yerleştirildiği sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda başarılı sonuçlar elde edilebilmiştir. Yaklaşık olarak 350 mm’lik kalınlığa kadar ki sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıda yalnızca bir donatı tabakasına ihtiyaç duyulur. Texas’ta daha kalın olan sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar da inşa edilmektedir ve iki donatı tabakası ile başarılı performans ortaya koymuşlardır.

Enine donatılara herhangi bir amaç için ihtiyaç duyulmaz ama donatının sehpalara üzerine yerleştirilmesi durumunda boyuna donatının sabitlenmesine yardımcı olur. Çok daha düşük bir yüzde ve daha düşük çaptaki donatı çubukları bu amacın yeterli bir şekilde üstesinden gelebilmektedir.

7.2.8.16 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Üstyapılar İçin Kullanılacak En İyi Temel Tipi

Temel tabakaları, şunların sağlanması için rijit kaplamaların altına yerleştirilir:

- Yapısal kapasitenin artırılması,
- Malzemenin erozyon ve pompajının önlenmesi,

- Derz ve çatlaklarda yük transferine yardımcı olması,
- Sonraki kaplama işlemleri için bir çalışma platformu sağlaması,

Yüksek trafik hacimli rijit üstyapıların performansı, başta derz bozulmalarının ve plak çatlamlarının gelişimi olmak üzere büyük ölçüde temel tipinden etkilenmektedir. Bu tür karayolu rijit üstyapılarında bir temel tabakasının kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir temel tabakası olmadan inşa edilen rijit üstyapılar orta dereceli trafik yükleri altında bile iyi performans gösterememişlerdir. Ayrıca; sağlam, durabil bir temel tabakası üstyapının uzun bir hizmet ömrüne sahip olabilmesi için ihtiyaç duyulan üst yapı düzgünlüğünün sağlanmasında önemli bir role sahiptir.

Agrega (granüler) temeller, çimento ile işlenmiş (stabilize) temeller, asfalt ile işlenmiş (stabilize) temeller, düşük dozajlı beton (grobeton) temeller ve geçirimli (hem stabilize hem stabilize olmayan) temeller olmak üzere birçok farklı temel tipinin kullanılması mümkündür. Bu temel tiplerinin her birine ait olağanüstü başarılı performansların elde edildiği örnekler mevcuttur. Bununla birlikte; sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için uzun dönemli üniform desteğin sağlanabilmesi amacıyla bir stabilize temel tabakasının kullanılabilmesi önerilir. Bir rijit üstyapı için uygun temel tipinin seçilmesi sırasında birkaç faktörün göz önünde bulundurulması gerekir:

- Taban zeminin tipi (yumuşak, ince taneli taban zeminlerinin bulunması durumunda stabilize taban zeminleri özellikle önerilmektedir),
- Çeşitli temel tiplerine ilişkin yerel deneyimler (kaçınılması gereken durumlar),
- Rijit plak altındaki drenaj ihtiyacı (suyun dışarıya çekilmesi),
- Temel tabakası malzemesinin aşınabilirliği (veya stabilize temel altındaki taban zemininin aşınabilirliği),
- Önceden tahmin edilmiş trafik yükleri ve ihtiyaç duyulan desteklik düzeyi,
- Durabil olan malzemelerin elde edilebilirliği,
- Yüklenicinin farklı temel tiplerinin inşası ile ilgili olan deneyimleri,
- Ayrıntılı inşa faktörleri (çalışma platformu, inşa sırasında temelin neme karşı duyarlılığı),

- Üstyapı tipi (sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için her zaman stabilize zeminler özellikle önerilmektedir),
- Daha aşağıdaki tabakaların don korumasına olan ihtiyacı,
- Şimdiki inşa ve gelecekte yeniden inşa için sağlam bir çalışma platformuna olan ihtiyaç,
- Temel tabakasının maliyeti.

Temel tipi ayrı bir bölüm olarak düşünülmemelidir. Aksine temel tipinin seçimi ve tasarımı üstyapının tamamına uygun olarak yapılmalıdır. Farklı temel tiplerinin rölatif avantaj ve dezavantajları, anahtar tasarım faktörleri ile birlikte Tablo 7.12’de özetlenmiştir.

Temel tabakası aşınabilirliğinin, temel tabakasının üzerinde bulunan plağa verdiği desteklik üzerinde kayda değer bir etkisi vardır. PIARC (Permanent International Association of Road Congress) tarafından farklı temel tabakası malzemelerinin aşınabilirliği hakkında kapsamlı çalışmalar yapılmıştır ve şu sınıflandırmalar önerilmiştir.

- A Sınıfı (Erozyona karşı olağanüstü dirençli): %8 çimento içerikli grobeton (LCB) veya %6 asfalt içerikli asfalt ile işlenmiş temeller (ATB).
- B Sınıfı (Erozyona karşı dirençli): %5 çimento içerikli, tesiste karıştırma ile hazırlanan çimento ile işlenmiş temeller (CTB).
- C Sınıfı (Belirli koşullarda altında erozyona dirençli): %3,5 çimento içerikli, tesiste karıştırma ile yapılan çimento ile işlenmiş temeller veya %3 asfalt içerikli asfalt ile işlenmiş temeller.
- D Sınıfı (kabul edilebilir düzeyde aşınabilir): %2,5 çimento içerikli çimento ile işlenmiş temeller veya işlenmemiş agrega (granüler) temeller.
- E Sınıfı (ileri düzeyde aşınabilir): İşlenmemiş ince taneli zeminler.

Bununla birlikte; ABD’nin farklı temel tabakası malzemelerinin aşınabilirliği üzerinde yaptığı bir çalışmalar erozyonun minimuma indirilmesinde çimento ve asfalt içeriğinin önemini göstermektedir.

Tablo 7.12: Yüksek trafik hacimli karayollarında rijit üstyapılar için kullanılabilecek temel tiplerinin özeti [12]

Temel Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar	Anahtar Tasarım Düşünceleri
Geçirimli Temel (Stabilize veya Stabilize Olmayan)	Suyu üstyapıdan uzaklaştırır Erozyona karşı düşük hassasiyet Portland çimentosu betonunda neme bağlı bozulmaları azaltır	Zor inşa (stabilize olmayanlar) Altında granüler ayırma tabakası gerekliliği Limitli inşa trafiği Geleneksel agrega temelden %14 ile %24 oranında daha büyük olan maliyet	Filtre tabakasının tasarımı Kollektör/çıkış borularının tasarımı Yeterli stabilize edici içerik (Genellikle 200-250 lb/yd ³ çimento veya %2-3 asfalt içeriği ve soyulma için test) Kompaksiyon/kür
Grobeton	Uygulama kolaylığı Güçlü stabil platform Erozyona karşı yüksek dayanım Kaplama sürüş yüzeyini geliştirir Plak gerilmelerini azaltır (eğer bağlıysa)	Yüksek maliyet (geleneksel agrega temelden yaklaşık %22 oranında daha büyüktür) Plak üzerinde çatlama artışı Plak çatlamalarında artışa sebep olabilecek artan plak kıvrılmaları Pompajın önlenmesi için ihtiyacı duyulan granüler temel	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda daha kısa derz aralığı Temelin kütü Temelin plağa bağlanması (derzin altındaki temel kısmında kesme derz) Temel plağa bağlanacaksa derzlerin kertilmesi
Asfalt ile Stabilize Edilmiş Temeller	Kolay yapım süreci Güçlü stabil platform Erozyona karşı yüksek dayanım ama soyulma başlıca problemidir Kaplama sürüş yüzeyini geliştirir Plak gerilmelerini azaltır (eğer bağlıysa)	Yüksek maliyet (geleneksel agrega temelden yaklaşık %8-15 oranında daha büyüktür) Soyulmaya karşı duyarlılık Pompajın önlenmesi için ihtiyacı duyulan granüler temel	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda daha kısa derz aralığı Asfalt içeriği (önerilen %5-6) Düzenli kompaksiyon kritiktir Soyulma için test kritiktir Temelin bağlanması yararlıdır
Çimento ile Stabilize Edilmiş Temeller	Kolay yapım süreci Güçlü stabil platform Erozyona karşı yüksek dayanım ama soyulma başlıca problemidir Kaplama sürüş yüzeyini geliştirir Plak gerilmelerini azaltır (eğer bağlıysa)	Yüksek maliyet (geleneksel agrega temelden yaklaşık %8-15 oranında) Erozyona karşı hassas Artan plak kıvrılmaları Artan plak çatlamaları Pompajın önlenmesi için ihtiyacı duyulan granüler temel	Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda daha kısa derz aralığı Daha yüksek dayanımın elde edilmesi için çimento içeriği (önerilen %6-8) Temelin plağa bağlanması (derzin altındaki temel kısmında kesme derz)
Yoğun Gradasyonlu Agrega	Kolay yapım süreci Düşük maliyet	Erozyona ve bozulmalara karşı hassas Daha yüksek defleksiyonlar Uzun periyotlar boyunca nemi tutabilme olasılığı	Kompaksiyon Likit limitin, plastik limitin ve ince taneli malzemelerin kontrolü (geçirimsizlik için düşük ince taneli malzeme içeriği tercih edilir)

Temel ile plak arasında aderans sağlanması durumunda, stabilize edilmiş rijit bir temelin yapısal katkısı çok önemli olabilmektedir. Bununla birlikte, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda sağlanmasındaki amaç; plak çatlamalarının, derz bozulmalarının ve zımbalama etkisinin (punchout) önlenmesinde kritik bir rolü bulunan uniform destekliğin ve erozyon direncinin sağlanabilmesidir. Yapısal kapasite bakımından diğer birkaç tasarım faktörünün (örneğin; plak kalınlığı, portland çimento betonunun dayanımı, termal genleşme katsayısı ve kenar desteği) bir stabilize temele oranla daha direkt ve çok daha büyük etkisi vardır. Diğer taraftan, bir temel tabakası ile sağlanmış olan fonksiyonlar eklenen kalınlıkların yerine

kullanılamaz ve ağır trafiğin gözlemlendiği karayolları için daha yüksek kalitedeki malzemelerin ve daha yüksek çimento içeriklerinin (minimum %8) kullanılması önerilir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda stabilize bir temelin kullanıldığı durumlarda derz bozulmaları kayda değer derecede azdır. Bununla birlikte çimento ile işlenmiş olan ve düşük dozajlı beton temeller için yansıma çatlakları kaygı yaratmaktadır. Fakat enine veya boyuna derzlerin altında kalan çimento ile işlenmiş olan temel ve düşük dozajlı beton temel kesimlerinin çentilmesi ile bu durum elimine edilebilir.



Şekil 7.30: Asfalt banket boyunca her bir enine derz boyunca görülen erozyon. Ağır taşıtlar derz üzerinden geçtiğinde plak altında bulunan su büyük bir hızla dışarıya doğru çıkmak için zorlanır. [12]

7.2.8.17 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapılar İçin Stabilize Temeller

Stabilize temeller, yüksek trafik hacminin taşındığı çoğu durumda, özellikle yumuşak ve ince taneli olan taban zeminleri için, rijit üstyapıların inşasında önerilen temel tipidir. Yüksek trafik hacimli rijit kaplamaların altına sıklıkla; destekliğin artırılması, neme karşı duyarlılık ile erozyonun azaltılması ve kaplama işlemleri için düzgün-sağlam bir platformun sağlanması amacıyla stabilize temeller yerleştirilir. Bu tür üstyapılarda hem çimento ile stabilize olmuş temeller hem de asfalt ile stabilize olmuş temeller kullanılabilir. Bu, bağlanmamış agrega temellerin belirli koşullar altında - daha sonra söz edileceği gibi- kullanılamayacağı anlamına gelmez.

ABD’de ve Avrupa’da genellikle düşük dozajlı beton temeller kullanılmıştır ve ağır trafik yükleri altında mükemmel performans sağlanmıştır. Örneğin; düşük dozajlı beton temelin kullanımı ile iyi bir performansın gözlemlendiği California’da düşük dozajlı beton temellerin üzerine inşa edilen rijit üstyapı kesimlerinin asfalt ile

stabilize edilmiş olan temel üzerine veya çimento ile stabilize olmuş temel üzerine inşa edilmiş üstyapı kesimlerine oranla kayda değer derecede daha az bozulmalar görülmüştür. Üstün performansı nedeni ile şu anda California çoğunlukla; ağır trafik taşıyan derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için kayma donatılı derzler ile birlikte, altında kalın bir granüler alt temel tabakasının bulunduğu düşük dozajlı beton temeller kullanılmaktadır. Benzer şekilde Georgia'da; kayma donatılı derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar bir zayıf beton temelin ve 200 mm kalınlığındaki bir alt temelin üzerine inşa edilmiştir ve böylelikle çok iyi bir performans gözlemlenmiştir. Bununla birlikte artan alt yapı rijitliği nedeniyle, termal bükülme etkilerinden kaynaklanan enine çatlak olasılığını azaltmak için genellikle daha kısa derz aralıklarına (maksimum 4,5 m) ihtiyaç duyulur.

Çimentoyla veya asfaltla işlenmiş karışımların kurumlarca onaylanmış olan agregaları içermesi ve tercih edilen granüler malzeme gradasyonu özelliğini taşıması gerekmektedir. Bu malzemelerin erozyona karşı direncinin ve dolayısıyla karışımın baştan başa kalitesinin artırılması için; minimum %8'lik bir çimento içeriği ve %6'lık bir asfalt içeriği önerilmektedir. Her iki tipteki temel için 100 mm'den 150 mm'ye kadar olan kalınlıklar genellikle iyi sonuç vermiştir.

Asfalt ile işlenmiş temelerde kullanılan asfalt düzeyi iklime göre değişim göstermektedir ve karayolu kurumlarının geleneksel sıcak karışım asfalt betonu üstyapıları için kullandığı düzeyle tutarlı olmalıdır. Kaplama işlemleri süresince havanın sıcak olması bekleniyorsa rijit plakta rötre çatlaklarının oluşmasına neden olan temel tabakasındaki aşırı sıcaklık oluşumunun önlenmesi için temel tabakasının bir kireç harcı ile yıkanması (whitewash) gerekebilir. En iyi sonucun elde edilebilmesi için kireçle yıkama işleminin betonun yerleştirilmesinden bir gün önce yapılması gerekir. Bu, betonla asfalt arasındaki aderansı engellememelidir. Asfalt-agrega karışımı soyulma bakımından test edilmelidir. Bu test kesinlikle çok gereklidir. Çünkü test edilmeme durumunda geçmişteki birçok projede bozulmalara sıklıkla rastlanmıştır.

Çimento ile iyileştirilmiş temellere, başta donma-çözülme direncinin sağlanması olmak üzere, minimum serbest basınç dayanımının karşılanması için ihtiyaç duyulur. Genellikle, 7 günlük basınç dayanımı 3-5 MPa olarak belirlenmiştir, ama bu erozyonun önlenmesi için yeterli olamayabilmektedir. Temelin erozyon direncinin artırılabilmesi için yine minimum %8'lik bir çimento içeriği önerilmektedir. Bu

minimum çimento içeriği çimento ile iyileştirilmiş temellerin erozyonunun önüne geçilebilmesi için kesinlikle gereklidir.

Stabilize zeminlerin artan rijitlikleri nedeniyle plak kıvrılma (bükülme) etkilerinin minimuma indirilebilmesi için daha kısa derz aralıklarına (4,5 m veya daha az) ihtiyaç duyulabilmektedir. Bununla birlikte artan temel rijitliği aynı zamanda yükleme altında plak gerilmelerini azaltabilmektedir. Örneğin; yakın zaman içinde yapılan bir çalışmada 286 mm'lik derzli donatısız tipteki bir rijit üstyapının altındaki 180 mm'lik mevcut bir asfalt üstyapının, aderansı destekleyecek herhangi bir spesifik çalışma olmaksızın, plaktaki gerilmeleri kayda değer derecede azalttığı görülmüştür.

Destekliğin artırılması ve pompajın minimuma indirilmesi için stabilize temel altındaki kalın granüler bir alt temel tabakasının kullanımının da göz önünde bulundurulması gerekir. [20]

Geçmişte yansıma çatlaklarının önüne geçilebilmesi amacıyla, çimento ile stabilize olmuş veya zayıf beton temel ile aderansın kesilmesine ilişkin denemeler yapılmıştır. Örneğin; zayıf beton temel yüzeyinin, temel ile üzerindeki plak arasındaki aderansın kırılması amacıyla balmumu esaslı iki tabaka ile işlenmesi ABD'de sıkça rastlanan bir durumdur. Bunun yapılmasındaki amaç, temelde oluşabilecek rastgele çatlakların plak boyunca yansıma potansiyelini minimuma indirebilmektir. Bununla birlikte genellikle üst yapı tabakaları arasındaki kompozit davranış faydalıdır. Birkaç Avrupa ülkesinde, plak ile temel arasında aderansın iyileştirilmesine ilişkin aktif adımlar standart uygulamalardır. Örneğin; Almanya rijit plakla aderansı bulunan, 150 mm kalınlığında zayıf beton temel veya çimento ile iyileştirilmiş temel inşa etmektedir ve rijit plaktaki enine derzlerin alt kısmına rastlayan zayıf beton temel kesimleri temel kalınlığının 1/3'ü kadar çentiklenerek yansıma çatlağı endişesine son verilmiş olur. Plaklar arasındaki aderans; kenar gerilmelerini, defleksiyonları, termal bükülmeleri, nem eğilmelerini ve tabakalar arası erozyonu azaltan kalın monolitik (üstyapı ile altyapının ortak olarak çalıştığı yapı) bir tabaka sağlar.

Rijit üst yapı performansının geliştirilmesine ilişkin güçlü potansiyel nedeniyle, temel ile plak arasındaki aderansın tasarım felsefesine gereken önem verilmelidir. Aderansın kırılmasına iyi bir fikir olarak bakılmamaktadır. Pompajı ve zayıf beton temel altındaki desteklik kaybını önleyecek bir agrega temelin sağlanması özellikle önerilmektedir [20]. Alman tasarımları; stabilize temellerin altında, kalınlıkları 200 mm ile 500 mm arasında değişen kalın bir granüler örtü kullanmaktadır. Bu durum

Şili için de aynıdır. Almanya ve Şili’de zayıf beton temelin altında kalın granüler bir tabakanın kullanımının, rijit üstyapılarda gözlemlenen mükemmel performansa katkıda bulunduğu düşünülmektedir ve bunun çok önemli bir tasarım özelliği olduğuna inanılmaktadır. Bu, aynı zamanda ABD’deki California, Wisconsin ve Georgia eyaletleri tarafından da doğrulanmıştır.

7.2.8.18 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarında Rijit Üstyapılar İçin Yoğun Gradasyonlu Agregalı Temeller

Yoğun gradasyonlu agregalı temeller, rijit üstyapıların altına yerleştirilen geleneksel temel tabakalarıdır. Rijit üstyapıların inşasının yapıldığı ilk zamanlarda, araştırma çalışmaları direkt olarak taban zemini üzerine yerleştirilen rijit üstyapıların pompaja karşı direncinin olmadığını göstermiştir ve plak altına yerleştirilen granüler temelin bu problemin her zaman tamamıyla elimine edilmesini sağlamasa da azaltmaya yardımcı olduğu bulunmuştur. En az 150 mm kalınlığındaki yoğun gradasyonlu temel tabakaları, yüksek trafik hacimli rijit üstyapılar için genellikle stabil olan bir inşaat platformu olarak da kullanılmaktadır.

Yoğun gradasyonlu temeller genellikle yüksek kalitedeki kırmataş ve çakıldan oluşan granüler malzemeden oluşmaktadır. Temel tabakasında bulunan belirli miktardaki ince malzeme miktarı stabiliteye biraz katkıda bulunur ve malzemenin yerleştirilmesine yardımcı olur.

Yoğun gradasyonlu agregalı temel tabakası üzerine inşa edilen üstyapıların performans değerlendirmeleri sonucu pompajdan ve erozyondan kolaylıkla etkilendikleri görülmüştür. LTPP tarafından yapılan çalışmalar agregalı temel tabakalarının üzerine inşa edilen rijit üst yapılarındaki kayma donatılı derzlerde, asfalt veya zayıf beton temel üzerine inşa edilen üstyapılara oranla, daha fazla derz kusurlarının görüldüğünü ortaya koymuştur. AASHTO yol testi yoğun gradasyonlu agregalı temellerin pompaja karşı çok duyarlı olduğunu ve bunun derzli donatısız tipteki rijit üstyapı kesimlerinde önemli problemlere sebep olduğunu göstermiştir. PIARC tarafından üzerinde durulan aşınabilirlik testleri yoğun gradasyonlu agregalı temel tabakalarının ciddi bir erozyona uğrayabilme eğilimi gösterdiğine işaret etmiştir. Yine de azaltılmış rijitlik nedeniyle orta derecedeki trafik yükleri altında yoğun gradasyonlu temel üzerine inşa edilen üstyapıların oldukça iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. [20]

Kuru ve ılıman bir iklimin görüldüğü Arizona eyaletinde bağlayıcısız kaba daneli agrega temel üzerine inşa edilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çok iyi bir performans elde edilmiştir. Yağışlı ve soğuk iklimlerin görüldüğü ve ağır trafik altındaki rijit üstyapılarda asfalt veya çimento ile stabilize edilmiş temel tiplerinin kullanımı çok daha fazla yaygındır. Orta ile yüksek seviyedeki trafiğin taşındığı rijit üstyapılardaki agrega temel tabakaları için; üstyapıya ek bir desteklik sağlaması ve temelin düşey drenajını artırması bakımından kalın bir alt temelin kullanılması önerilmektedir. Bir alt temel aynı zamanda zemin üzerine sadece yoğun gradasyonlu bir temel tabakasının yerleştirilmesi durumunda gerekli olabilecek ek temel/alttemel düzeltmeleri olmaksızın üst yapının yeniden inşasına veya yeniden kullanımına olanak tanır.

7.2.8.19 Stabilize Temel Tabakasının Altına Granüler Alttemel Tabakasının Yerleştirilme Nedeni

Stabilize bir temel (asfalt, çimento) kullanıldığında, taban zemini (nemli, ince taneli zemin) üzerine granüler bir alttemelin yerleştirilmesi oldukça önemlidir. Bu uygulamaya ağır trafikli karayollarında granüler bir tabaka olmaması durumunda ortaya çıkabilecek taban zemini erozyonunu önlemek için başvurulur. Birçok karayolu kurumu böyle bir granüler alttemel tabakası kullanmaktadır ve bunun sonucunda malzeme pompajı ve derzli donatısız tipteki veya sürekli donatılı tipteki üstyapılarda desteklik kaybının çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu tabaka aynı zamanda üzerine yerleştirilen stabilize temel tabakasının uygun şekilde kompaksiyonuna büyük oranda yardımcı olur.

7.2.8.20 Genişletilmiş Bir Plakın Performans Üzerindeki Etkisi

Genişletilmiş plak; normal genişliğindeki kesimden yol şeridi boyasıyla ayrılan 0,5 m'lik ekstra bir beton genişliği anlamına gelmektedir. Genişletilmiş bir plakın kritik defleksiyonları azaltma üzerinde, derz kusurlarıyla sonuçlanan gerilmelerin azaltılmasında ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için plaktaki enine çatlakların büyük oranda önüne geçilebilmesi üzerinde temel bir etkiye sahiptir. Genişletilmiş bir plak aynı zamanda rijit üstyapılardaki zımbalama etkisini (punchout) azaltır. Genişletilmiş bir plak kullanıldığı zaman plak kalınlığı sıklıkla 25 mm veya daha fazla azaltılır. 0,25 m genişletilmiş bir plak yukarıda söz edildiği kadar olmasa da bir yarar sağlayacaktır.



Şekil 7.31: Genişletilmiş banketler (0.5 m) plak kenarındaki yükleri, derz bozulmalarını ve plak çatlamalarını azaltır. [12]

7.2.8.21 Banket Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Konular

Geniş, kaplanmış banketler mahsur kalarak durmak zorunda kalan araçları işleyen trafik şeritlerinden ayırarak onlara uygun bir alan sağlarlar ve yüksek trafik hacimli tüm karayolu tesislerinde sağlanmaları gerekir. ABD'deki eyaletler arası tüm karayollarında kaplanmış banketler gerekli kılınmıştır ve genellikle dış banket genişliği 3 m ve iç banket genişliği 1,2 m'dir. Banketler aynı zamanda zor durumda kalabilen araçlar için acil yardım alanları olarak da yararlanılabilir. Banketlerin tüm hava koşullarında kullanılabilecek bir yüzeye ve yeterli yapısal kapasiteye sahip olmaları gereklidir. Yüksek trafik hacimli karayollarında çayırılık veya çim parçaları kullanarak elde edilen malzemeye oluşturulan dolgularla meydana getirilen banketler kullanılmamalıdır. [22]

Banketlerin karayolu yüzeyi ve trafik şeridi sınırı ile aynı düzlemde olmalıdır. Bütün banketlerin karayolundan suyu dren edebilecek şekilde yeterli eğime sahip olması gerekir. Asfalt betonu ve portland çimentosu ile kaplanmış banketlerin %2 - %6 eğimde, çakıl ve kırmataş banketlerin %4 - %6 ve çayırılık banketlerin %8'lik eğimde olması gerekir. Üstyapının dış tarafında suyu dren eden banket eğimlerinin deverli kesimlerde enkesit eğimini aşırı artırmayacak şekilde tasarlanması gerekir. Yüksek trafik hacimli karayolları için tüm genişliğince kaplanmış olan banketlerin kullanımı kesinlikle önerilmektedir. Genişletilmiş şeritlerin banket kısımlarında tırtıklı ince şeritlerin kullanımı göz önünde bulundurulmalıdır. Genişletilmiş şeritlerde banketlerin kullanımına ilişkin genel tasarım parametreleri Tablo 7.13'de görülmektedir.

Tablo 7.13: Banket tipi/kenar destekliği kullanımı üzerine genel öneriler [12]

Fonksiyonel Sınıf	Önerilen Banket Tipi/Kenar Destekliği	
	Kırsal	Kentsel
Eyaletler arası yollar/ Ekspres yollar/ Otobanlar	1. Asfalt betonu banketli genişletilmiş plak 2. Monolitik olarak kaplanmış rijit banket	1. Monolitik olarak kaplanmış rijit banket 2. Rijit banketli genişletilmiş plak
Arterler	1. Asfalt betonu banketli genişletilmiş plak 2. Rijit banket 3. Hiçbiri (afalt banket)	1. Monolitik olarak kaplanmış rijit banket 2. Rijit banketli genişletilmiş plak

Kentsel otoyollarda ve yüksek kamyon trafiği hacimlerini taşıyan diğer karayollarında, inşa kolaylığı ve ekonomisi ile üstyapı altında bir banyo teknesi durumunun (bathtub) önlenmesi açısından banketlerin; ana şerit ile aralarında yeterli yük kapasitesinin sağlanabilmesi için üstyapı ana şeridi ile aynı yapısal kesitte inşa edilmesi gerekmektedir. Bu aynı zamanda banketlerin acil durumlarda veya rehabilitasyon uygulamaları sırasında geçici bir servis yolu olarak kullanımına olanak tanır.

Özellikle yüksek trafik hacimli karayollarında, ana şerit altında olduğu gibi aynı tipteki ve genel kalınlıktaki temel ve alttemel malzemesinin kullanılması gerekir. Beton banketlerin altındaki temel ve alttemel eğiminin tasarımında, şerit/banket derzi ve banket kenarı altında suyun toplanma riski göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bölgelerde; üniform olmayan bir desteklik veya drenaj karakteristiklerindeki değişiklik ile sonuçlanan malzeme tipindeki farklılık nedeniyle problemlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Ayrıca, derin don alanlarında farklı kalınlık ve malzeme özelliklerini taşıyan bir banket komşu trafik şeridinden daha fazla don kabarması gösterebilir ve bir güvenlik problemi oluşturur (ve çözüldükten sonra detorasyon problemi ortaya çıkabilir).

Agrega temellerde, en azından düşük hızdaki dışarıya olan su drenajının sağlanması ve banket drenaj sisteminin tıkanmasının önlenmesi ve pompaj etkisinin minimize edilebilmesi için 200 No'lu elekten geçen ince taneli malzeme içeriğinin %6'yı geçmesinden kaçınılmalıdır.

Banket tasarımında banket üzerine park edeceği tahmin edilen kamyon sayısının göz önünde bulundurulması gerekir. Bu çoğunlukla, geceleri değış tokuş ile dinlenme alanlarında ve açık-kapalı rampalarda gözlemlenen bir durumdur. Banket bu tür bir yükleme dikkate alınmadan tasarlanırsa kayda değer hasarlar meydana gelmektedir.



Şekil 7.32: Rijit banketler yapısal desteklik sağlarlar ve acil durum şeridi olarak kullanılabilirler. [12]

Beton banketlerin, düzenli aralıktaki ve boyuttaki bağ donatılarıyla ana şeritlere bağlanmış olması gerekir. Sıkı ve dar bir şekilde inşa edilmiş bir derzle bağlanmış olan rijit banketler iyi yük transferi sağlayarak üstyapı gerilmelerini ve kenar defleksiyonlarını azaltır. Sıkı derzle bağlanan banketler aynı zamanda boyuna derzlerin daha kolay doldurulmasıyla sonuçlanacaktır ve düzenli bakımları yapıldıklarında üst yapı içine sızan suyu etkili bir şekilde azaltacaktır. Boyuna derzlerin sıkı bir şekilde tutularak gerekli yük transferini sağlaması ve derzlerin açılması sonucu güvenlik probleminin ortaya çıkmasının önlenmesi için ana şerit ile banket arasına yerleştirilen bağ donatılarına ihtiyaç duyulur. Yüksek trafik hacimli karayollarında elde edilen deneyimlere göre ortaya konup önerilen bağ donatısı boyut ve aralıkları şöyledir:

- No.6 nervürlü demir (19 mm çap)
- 0,76 m aralık
- 40.Sınıf veya daha yüksek sınıftaki çelik

Ana şeritlerdeki enine derzler sürekli şekilde banket boyunca uzatılmalıdır. Banketlerdeki tüm enine derzler plak kalınlığının 1/3'ü derinliğinde kesilmelidir.

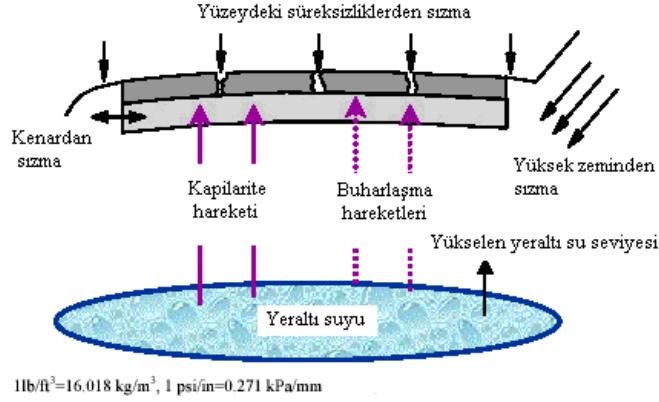
Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların ana şeridine bitişik olarak derzli donatısız tipteki rijit banketlerin kullanılması durumunda banket derzlerinin 4,5 m veya daha kısa aralıklarla kesilmesi gereklidir. Derzli donatısız tipteki rijit banketlerin sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarla bir bütün halinde inşa edilmesi sakıncalıdır. Bu şekilde inşa edilen banketlerdeki enine testere kesimleri sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki şerit boyunca çatlakların artmasına neden olur. [22]

7.2.8.22 Yüksek Trafik Hacimli Karayollarındaki Rijit Üstyapılarda Kullanılan Drenaj Sistemleri

Yüzey altı drenajın üstyapı performansı üzerindeki önemi oldukça uzun bir süre önce kabul edilmiştir. 1820 yılı gibi erken bir zamanda John Mc Adam (Adam, J.L. *Report to the London Board of Agriculture*, London, England, 1820), yapı kalınlığı ne olursa olsun, taban zemininin suya doymun olduğu durumda, Büyük Britanya'daki birçok yolun hızlı bir şekilde bozulduğunu söylemiştir. Üstyapı tabakalarındaki aşırı nem, ağır kamyon trafiği ve neme karşı duyarlı malzeme karakteristikleri birleştiğinde servis ömrünü azaltabilmektedir. Aynı zamanda yetersiz drenaj, don sıcaklığının altındaki derecelerde suya doymun malzemelerin durabilite problemlerine de katkıda bulunur.

Taban zeminindeki ve üstyapıdaki nem, Şekil 7.33'te gösterildiği gibi birçok kaynaktan gelebilmektedir. Su; kapiler emme veya buharlaşma hareketlerinden dolayı, yüksek yer altı suyundan yukarı doğru sızabilir yada üstyapı kenarlarından ve kenar hendeklerindeki yanıl akımlardan kaynaklanabilir. Özellikle daha yaşlı olan bozulmuş üstyapılarda suyun diğer bir kaynağı, yağmur suyu ve erimiş suyun derzlerden, çatlaklardan ve banket kenarlarından yüzeysel sızmasıdır. Bazı çalışmalar üstyapı içine sızan suyun %40'ının yağış sularının sızmasıyla geldiğini göstermektedir. [10]

Durabilite çatlağı gibi üstyapıda aşırı gerilmeler nedeniyle oluşan bozuklukların öncelikli sebebi nemdir veya bu bozukluklar nemin varlığında hızlanmaktadır. Derz bozulmaları, pompaj ve desteklik kaybı nem varlığında çok daha ciddi bir hal alır. Bu yüzden uygun drenaj, üstyapıda aşırı gerilmeler nedeniyle oluşan bozulmaların ilerleme hızını azaltarak üstyapı ömrünü artırır.



Şekil 7.33: Üstyapı sisteminde nem kaynakları [12]

Alt drenaj ihtiyacı taban zemininin doğal drenaj karakteristiklerine, yağış miktarına ve trafik düzeyine göre değişim gösterir. Örneğin; kurak iklimlerin görüldüğü bölgelerdeki kaba daneli taban zeminlerindeki drenaj ihtiyacı yağışlı iklimin görüldüğü bölgelerdeki ince daneli taban zeminlerinin drenaj ihtiyacı kadar kritik değildir.

Drenaj ihtiyacının belirlenebilmesi için; drenaj analizi normal bir üstyapı tasarımının bir parçası olarak ele alınmalıdır. Nem problemlerinin azaltılması veya kontrol altında tutulabilmesi için geliştirilen genel yaklaşımlar aşağıda listelenmiştir:

- Üstyapıya nemin girişi önlenmelidir,
- Nem etkilerine duyarlı olmayan malzemeler kullanılmalıdır,
- Nem problemlerinin yol açtığı zararları minimuma indirecek tasarım özellikleri dikkate alınmalıdır,
- Üstyapıya dahil olan nemin olabildiğince çabuk şekilde uzaklaştırılması gerekir.

Ağır trafiğin taşındığı karayollarında nemin yol açtığı zararların uzun bir periyot boyunca kabul edilebilir düzeyde kontrol altında tutulabilmesi için bunların tümünün veya birçoğunun birleştirilmesine gerek duyulabilir.

• Üstyapı Sistemine Suyun Girişinin Önlenmesi

Yüzeysel sızıntının minimuma indirilebilmesi için ve suyun üstyapı üzerinden hızlıca dren edilebilmesi için yeterli enine ve boyuna eğimin sağlanması gerekir. Enine eğimler, hendek derinliği ve hendeklerin boyuna eğimi gibi ayrıntılar drenaj

gerekliliklerinde kritik rol oynar ve kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Örneğin; bu faktörlerden herhangi birisi yetersizse (örneğin; düz enine eğim, yüzeysel drenaj hendekleri veya boyuna eğimin olmaması) drenaj sistemi ne kadar iyi tasarlanmış yada işlenmiş olursa olsun üstyapının drenajı sağlıklı bir şekilde gerçekleşmeyecektir.

Üstyapıda ana şeritlerdeki minimum enine eğimin %2 olması önerilmektedir ve bunun banket yüzeyleri için %3-4 artırılması gerekmektedir. Yarma kesimlerinde ve eğimli kısımlarda 0,9-1,2 m genişliğindeki hendekler önerilmektedir ve bu değerler hendek içinden akacak olan yağış suyu miktarına göre değişim göstermektedir. Hendekler üstyapı ana şerit yüzeyinin kenarından minimum 1,2 m derinlikte olmalıdır ve bu derinlik içeriye sızması tahmin edilen akış miktarına göre artırılabilir. Hendeklerin boyuna eğimi minimum %1 olmalıdır. Bu öneriler Tablo 7.14'te özetlenmiştir.

Tablo 7.14: Drenaj etkisinin artırılması için üstyapı en-kesit önerileri [12]

En-Kesit Özellikleri	Öneriler
Kaplama Enine Eğimi	Minimum %2
Banket Enine Eğimi	Minimum %3
Hendek Eni	0.9 – 1.2 m
Hendek Derinliği	Minimum 1.2 m (eğer daha büyük akım bekleniyorsa derinlik artar)

Üstyapıdan suyun dren edilebilme yeteneğinin korunması için açık düşey kurplarda, kapalı düşey kurplarda, deverli kesimlerde ve yarmadan dolguya geçiş kesimlerinde drenaja özel bir önemin verilmesi gerekir.

Üstyapıdan suyun dren edilebilmesi üzerinde rol oynayan diğer önemli bir faktör de temel tabakasının enine eğim tasarımıdır. Geçmişte beton plağın ve aynı zamanda ince (50-75 mm) asfalt betonu banket kaplamasının altına stabilize edilmiş veya yoğun gradasyonlu bir temel yerleştirilmekteydi. Böyle bir düzen boşluklardaki serbest suyun yoğun gradasyonlu malzeme boyunca ne yatay ne de düşey doğrultuda dren edilemediği banyo teknesi (bathtub) kesimlerinin oluşmasına sebep olmuştur. Aşırı nemin etkili bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için bu tür enkesitlerden kaçınılması gereklidir.

- **Nem Etkilerine Karşı Duyarsız Malzemeler**

Nemin sebep olduğu zararların önlenmesinin diğer yolu neme karşı duyarlı olmayan veya nemin zararlı etkilerinden daha az etkilenen, erozyona karşı dirençli olan malzemelerin kullanılmasıdır.

Pompajla ilgili problemlerin ve rijit üstyapıdaki bozulmaların minimuma indirilmesinde sağlam ve erozyona dirençli çimento ile stabilize edilmiş veya asfaltla işlenmiş malzemelerin kullanılması etkili olabilmektedir. [20] Durabilite için yapılan geleneksel dayanım testlerine ek olarak, bu tür malzemelerin aynı zamanda nemsel erozyona karşı direncinin de kontrol edilmesi gerekmektedir. Asfalt ile stabilize edilmiş temellerde karışımın nem duyarlılığı tamamen araştırılmalı, soyulmayacağına garanti edilmesi için test edilmelidir. Çünkü soyulma (genellikle suyun etkisiyle bitümlü bağlayıcının agrega yüzeyinden atılması veya agreganın sathi agregadan parçalar halinde koparak önceki yol yüzeyini açıkta bırakması) meydana gelirse bu üstyapının süratle bozulmasına neden olur. Genellikle daha yüksek çimento içeriği ve basınç dayanımına sahip olan malzemeler, nemsel erozyonun sebep olduğu zararlı etkiye karşı daha dirençlidir. Tabakanın bozulmayacağından emin olunması için minimum bir dayanıma gerek vardır. Açıkçası, yüksek kalitedeki kırmataş agregalara aynı zamanda uzun dönemli durabilitenin de garanti edilebilmesi için ihtiyaç duyulur. Büyük bir kısmını düşük ince daneli malzeme içerikli kırmataş malzemenin meydana getirdiği düşük plastisiteli granüler malzemeler, nem etkileri ile mücadele etmekte kullanılabilir. Bununla birlikte, bazı malzemelerin nemin zararlı etkilerini azaltma veya geciktirme etkisine rağmen; ağır trafik yükünün taşındığı üstyapılarda, nemle ilişkili problemlerin çözümünde neme duyarlılığı olmayan malzemelerin kullanımı tek başına yeterli olmamaktadır.

- **Rijit Üstyapılarda Nemin Neden Olduğu Zararları Minimuma İndirecek Tasarım Özellikleri**

Neme karşı duyarlı olmayan malzemelerin kullanımından ayrı olarak diğer birçok tasarım özelliği nemin sebep olduğu zararları minimuma indirmede kullanılabilir. Derzli rijit üstyapılarda şu tasarım seçenekleri kullanılabilir: [10]

- Enine derzlerdeki yeterli boyut ve aralıktaki kayma donatıları,
- Genişletilmiş plaklar (0,6 m),

- Bağlanmış beton banketler,
- Taban zemini ile stabilize edilmiş temel tabakası arasında granüler bir tabakanın bulundurulması,
- Üstyapının alt kısmında akım kanalı yeterli kenar hendeklerinin bulundurulması.
- **Üstyapı Kesitine Giren Serbest Suyun Uzaklaştırılması**

Son 20 yıldır yüzey altı drenajın (aynı zamanda altdrenaj da denmektedir) kullanımının popülaritesi artmıştır ve birçok kurum üstyapıda neme ilişkin problemlerin azaltılabilmesi için dren edilebilir üstyapıları gerekli kılmıştır. Altdrenaj sistemleri öncelikle çatlaklar ve üstyapı yüzeyindeki süresizliklerde meydana gelen su sızıntısına hitap etmektedir. Altdrenaj alternatifleri komplekslik ve maliyete göre değişim gösterir. ABD’de 1990’lı yıllardan beri açık gradasyonlu drenaj tabakalarının boyuna kenar drenlerine ve bunların da çıkış kanallarına bağlandığı tipik drenaj tasarımları kullanılmaktadır. Daha önce alt drenaj problemini çözeceğine inanılan tasarım metotları kendisine ait birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Geçirimli bir temel tabakasının kullanımı ile gelen başlıca problemler şunlardır:

- Geçirimli temel tabakası, alt tabakalardaki veya banketteki tüm ince malzemelerin pompajına neden olur. Birçok geçirimli temel aşırı açık gradasyonlu agregalardan (belirli bir boyutta hiç yada çok az miktarda malzeme içeren ve sıkıştırıldığında daneler arası boşluk alanının yüksek olduğu agrega gradasyonu) (>1000 ft/gün) oluşmaktadır ve bu stabilite bozukluğu ile pompaja yol açmaktadır.
- Geçirimli temellerde yüksek defleksiyonlarla sonuçlanan çatlaklar ve köşelerde desteklik ile stabilite kaybı görülmektedir (asfalt ile stabilize geçirimli temellerde soyulma, bağlayıcısız geçirimli agrega temellerde stabilize kaybı).
- Boyuna kenar drenleri ve enine yatay kanallar, inşa sırasında kırılabilmektedir. Enine drenaj kanallarının uçları zamanla tıkanmakta ve bakım personeli tarafından temizlenememektedir. Bu sebeple suyun üstyapı dışına drenajı durmaktadır.
- Drenaj sisteminin inşası üstyapı maliyetini %20 oranında artırmaktadır.

Sonuç olarak yüksek trafik hacimli üstyapılarda geçirimli bir temel tabakasının kullanımı uzun ömürlü bir alt drenaj sisteminin sağlanması açısından güvenilir

değildir ve maliyetli bir alternatiftir. Çalışan bir alt drenaj sistemi, üstyapı performansı bakımından, uzun bir tasarım periyodu boyunca yanlış gidebilecek birçok konu nedeniyle aşırı bir risk taşımaktadır.

Daha genel olarak uygulanan drenaj alternatifleri şöyledir:

- Kenar dren kanallı geçirimli temel sistemi,
- Uzatılmış (Daylighted) geçirimli temel sistemi,
- Kenar dren kanallı aşınmaya karşı dirençli temeller,
- Kenar dren kanallı aşınmaya karşı dirençli temel ve poröz beton banket,
- Uzatılmış (Daylighted) yoğun gradasyonlu agrega temeller (DGAB),

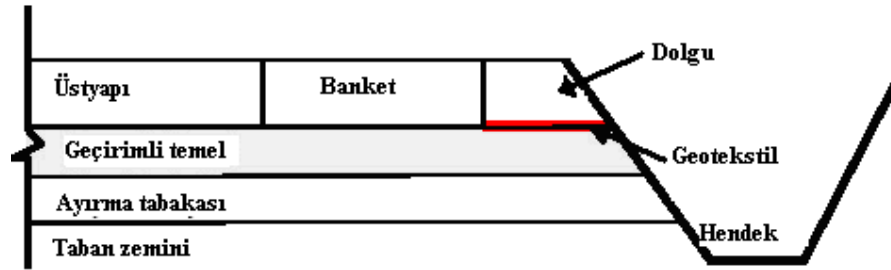
Geçirimli bir temel; tipik laboratuvar permeabilite değerinin 300 m/gün veya daha düşük olduğu açık gradasyonlu bir drenaj tabakasıdır. Geçirimli temelin öncelikli fonksiyonu kabul edilebilir bir zaman çerçevesinde üstyapı kenarlarından yanal hareketle gelen su sızıntısını dağıtmaktır. Drenaj yolu ve hidrolik eğim üstyapı geometrisine göre belirlenir. Bu tanımlama ile bu tabakalar, taban zeminine doğru olan düşey drenajın hidrolik iletkenliği düşük olan malzemeler tarafında engellendiği yerlerde kendi varlıklarını bağımsız olarak sürdürebilirler.

Önerilen minimum ve maksimum geçirimli temel tabakası kalınlığı 100 mm'dir. Bu öneri suyun serbest akımı için yeterli bir hidrolik kanal sağlar ve diğerlerine göre kararsız kalınan tabaka kalınlığı için bir üst limit tayin eder. Yüksek trafik hacimli karayollarında kullanılan geçirimli temellerin; permeabilitesinin 300ft/gün'den az olduğu asfalt ile işlenmiş veya çimento ile işlenmiş tipte olması gerekir. Taban zemininden veya diğer alt tabakalardan gelen ince malzemenin geçirimli temel tabakasını kirletmediğinden emin olmak için geçirimli temel tabakasının altına her zaman ayırıcı bir tabaka yerleştirilmelidir. Aksi takdirde üstyapıda ciddi bozulmalar gözlemlenir.

Kenar dren borulu geçirimli temel tabakası sistemi en eksiksiz yüzey altı drenaj alternatifidir. Bu sistem geçirimli bir temel tabakasından, çıkış borularından, yarma hendeğinden oluşmaktadır. Bu tasarımda bozulmuş veya defleksiyona uğramış üstyapı yüzeyinden sızan su, taban zeminine doğru düşey akım yerine, geçirimli temel/ayırma tabakası ara yüzeyinde yanal akım hareketiyle kenar drenlerine ve çıkış kanallarına yönlendirilir. Kenar dren kanalları, geçirimli temelden dışarıya çıkan

büyük miktardaki suyu kontrol altında tutabilecek yeterli hidrolik kapasiteye sahip olmaları nedeniyle kullanılmaktadırlar ve video araçlarıyla denetlenip bakımları yapılabilmektedir. Kenar drenleri etraftaki ince malzemenin kanal içine girişinin önlenmesi için bir geotekstil ile kısmen sarılmış bir hendek içine yerleştirilirler. Ayırma tabakası bir agrega tabakadan, bir geotekstil tabakadan veya bu ikisinin kombinasyonundan meydana gelebilmektedir. Geri dolgu malzemesinin, geçirimli temelle eşit veya daha büyük olan bir permabiliteye sahip olması gerekir. Malzeme işlenmemiş, çimento veya asfalt ile stabilize olan tipte olabilir.

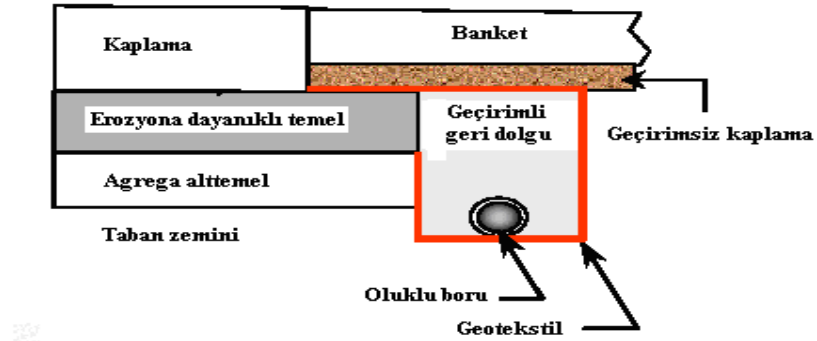
Uzatılmış geçirimli temel sistemi; geçirimli temelin genişletilmesi ve yarma hendeğine kadar uzatılması dışında kenar dren kanallı geçirimli temel sistemi ile benzerdir. Bu tasarım Şekil 7.34’de görülmektedir. Bu tasarım üstyapı boyuna eğiminin düşük (%0,5’ten az) olduğu durumlarda veya enine eğimin yüzey altı drenajı kontrol edeceği açık düşey kurp kesimlerinde uygulanabilmektedir. Şekildeki dokuma ayıracın fonksiyonu geçirimli temelin dolgu malzemesi tarafından kirletilmesinin önüne geçilmesidir. İyi bir performans elde edilmesi için uzatılmış (daylighted) temel kenarlarının bakımı önem taşır.



Şekil 7.34: Uzatılmış geçirimli temel sistemi [12]

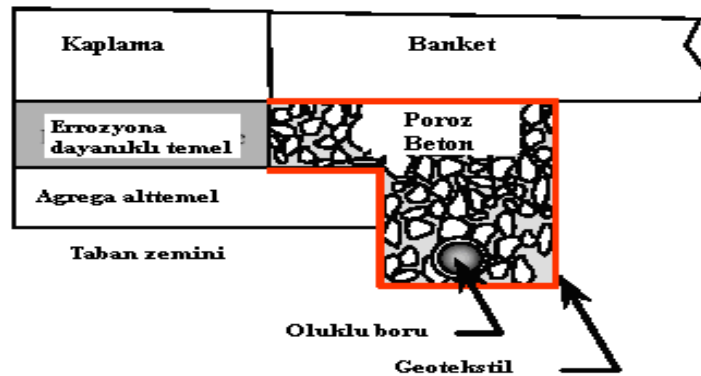
Kenar dren kanallı aşınmaya dirençli temeller biraz maliyetlidir. Fakat geçirimli temel tabakası tasarımı için etkili bir alternatiftir. Kenar drenler, açık gradasyonlu geri dolgu malzemesi ile doldurulmuş bir hendek içine yerleştirilirler. Şekil 7.35’de bu tasarım tipinin bir taslağı görülmektedir. Agreganın alt temel, işlenmiş temel tabakasının altındaki erozyonu büyük oranda azalttığından dolayı bu tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır. “Aşınmaya karşı dirençli temel” terimi durabil özellikteki asfalt veya çimento ile işlenmiş temellere karşılık gelmektedir. Kenar drenlerinin fonksiyonu; şerit/banket derzinden ve yüzey çatlaklarından üstyapıya dahil olan suyu toplamaktır ve bu suyu çıkış kanalları ile yarma hendeklerine doğru taşımaktır. Bu

tasarım nem sebebiyle üstyapıda oluşan aşırı gerilmelerin meydana getirdiği bozulmaların üstyapı ömrünü azalttığı veya azaltacağı düşünülen yerlerde yeni inşa, yeniden inşa veya rehabilitasyon için pratik bir seçenektir.



Şekil 7.35: Kenar dren borulu erozyona dayanıklı temel [12]

Kenar dren kanallı aşınmaya dirençli temel ve poröz beton banket sistemi trafik şeritlerinin altındaki aşınmaya karşı dirençli bir temeli ve kenar drenlerine uygun olan banket altındaki çimento ile işlenmiş geçirimli bir temeli içermektedir. Şekil 7.36'da bu tasarımın bir taslağı görülmektedir. Bu tasarımla, kenar dren kanallı aşınmaya karşı dirençli drenaj sistemi tasarımı arasındaki fark; kenar dren yatağında kullanılan geri dolgu malzemesidir. Bu tasarımda hendek geri dolgusu olarak kullanılan çimento ile stabilize edilmiş malzeme banket altında daha güçlü desteklik sağlar ve banket oturma problemlerini hafifletir. Buna karşılık olarak bu tasarım aynı zamanda inşa maliyetini de artırmaktadır.



Şekil 7.36: Poröz beton banketli erozyona karşı dayanıklı temel [12]

Yoğun gradasyonlu uzatılmış agrega temel, eğer saha koşulları drenajın fizibil olduğunu gösteriyorsa göz önüne alınmalıdır. Bu tasarımda yoğun gradasyonlu bir agrega temel üzerine inşa edilen bir kaplama (genellikle rijit bir kaplama) yarma

hedeğine kadar direkt olarak uzatılır edilir. Birçok kurum bu tasarımı başarıyla kullanmaktadır.

- **Alt Drenaj Önerilerinin Sonuçları**

Birçok inceleme ve araştırma çalışmalarına dayalı olarak, geçirimli tabakaların getirdiği problemlerin çözdüklerinden fazla olduğuna inanılmaktadır ve maliyeti en az %20 oranında artırmaktadır. Bu düşünce şu noktalara dayanarak belirtilmektedir:

- Geçirimli temeller, yanal çıkış borulu boyuna kanallar hızlı bir drenaj sağlamaktadırlar. Fakat erken çatlak problemlerine yol açan diğer ciddi problemlere sıklıkla sebep olmaktadır. Bunu oluşumundaki temel neden alt drenaj kanallarının ve çıkış borularının bakımındaki yetersizliktir.
- Eğer geçirimli bir temel kullanılırsa bunun yeterli derecede stabil ve durabil olması gerekir (çok uzun ömürlü stabilizör kullanılmalı veya serbest suyun sızmasına izin verecek limitli permeabiliteye sahip bağlayıcısız agregaların kullanılması gerekir).
- Performans verileri, yağışlı iklimin görüldüğü yerlerde ağır trafik altında iyi performans gösteren geçirimli temel tabakası olmadan da rijit bir üst yapının dizayn edilebileceğini göstermiştir.
- Aşırı nemden kaynaklanan problemlerin önlenmesinde çeşitli tasarım özellikleri kritik rol oynamaktadır. Bunlardan en kritiği enine derzlerde büyük çaptaki kayma donatılarının kullanımıdır. Genişletilmiş plaklar veya bağlanmış rijit banketler altında granüler bir tabaka bulunan aşınmaya karşı dirençli stabilize temeller, “banyo teknesi” oluşumundan sakınılarak yapılan ıztatılmış (daylight) edilmiş temel tasarımı kullanımı diğer önemli tasarım konularıdır.

Geçirimli bir temelin bir avantajı ise rijit plağın çok fazla suya doymamasıdır. Böylelikle betonda bazı durabilite problemleri azalmış olur.

7.2.8.23 Tasarımda Göz Önünde Bulundurulmuş Yüzey Karakteristikleri

Bir rijit üstyapı yüzeyi kullanıcıya uygun sürtünme düzeyini, düşük tekerlek/üstyapı gürültüsünü ve tüm tasarım periyodu boyunca düzgünlüğü sağlayabilmelidir. Bu nitelikler yüksek trafik hacimli üstyapılarda kritik rol oynar. Günümüzde bu alan oldukça fazla tartışılan bir konudur ve rijit üstyapılarda uzun ömürlü ve güvenilir yüzeylerin geliştirilmesi için ek araştırmalara gerek vardır. Şu anda üstyapı/tekerlek

gürültüsüne yönelik olan ve hala iyi sürtünme ile düzgünlük sağlayan dört metot karayolları kurumlarınca kullanılmaktadır:

- Yerleştirmeden sonra yüzeyin boyuna pürüzlendirilmesi,
- Avustralya'daki gelişigüzel enine aralıklandırma,
- Açığa çıkartılmış agrega yüzey,
- Elmas uçla boyuna doğrultuda taşlama (öğütme),
- Açık gradasyonlu asfalt malzemeyle oluşturulan ince kompozit yüzeylendirme ile meydana getirilen takviye tabakaları.

7.2.9 Rijit Kaplama Tabakalarıyla Takviye Edilen Mevcut Üstyapı Tipleri

Neredeyse her tipteki ve durumdaki mevcut üstyapı, iyi dizayn edilmiş derzli donatısız tipteki veya sürekli donatılı tipteki rijit kaplama tabakaları ile takviye edilebilir. Bu; derzli donatısız tipteki mevcut rijit üstyapıyı, derzli donatılı tipteki rijit üstyapıyı, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıyı ve tabi ki herhangi bir tipteki mevcut asfalt üstyapıyı kapsamaktadır. Tasarımın, saha koşullarını karşılayabilecek özel bir biçimde yapılması gereklidir ve özellikle mevcut üstyapının tasarımı ile durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Tekerlek izinde oluklanmaların olduğu ve yorulma çatlaklarının görüldüğü eski bir mevcut asfalt üstyapı, rijit kaplama ile takviye açısından ideal bir adaydır. Sıklıkla mevcut asfalt üstyapının kaplama için düzgün ve üniform bir yüzeyin sağlanması bakımından ince bir kısmı öğütülür. Mekanistik prensiplere dayalı olan tasarım prensipler NCHRP 1-37A projesinden elde edilebilir.



Şekil 7.37: Rijit takviye tabakası mevcut bir üstyapı üzerine yerleştirilirken. [12]

8. NCHRP 1-37 A PROJESİ 2002 TASARIM KILAVUZU - YENİ VEYA YENİDEN İNŞA EDİLEN RİJİT ÜST YAPILARIN TASARIMI

AASHTO 1972 tasarım yöntemi, ülkemizde KGM tarafından yüksek standartlı yolların, BSK kaplamalı yolların üstyapı tasarımında yıllardır kullanılmaktadır. AASHO 1972 tasarım yönteminde, günün koşullarına uygun değişiklikler yapılarak, özellikle zemin esneklik modülünü üstyapı tasarımında dikkate alan AASHTO 1986 ve 1993 yöntemleri ortaya konmuştur. Ülkemizde de bu gelişmeler takip edilerek gerekli yenilikler izlenmektedir.

AASHTO 1972, 1986 ve 1993 tasarım yöntemleri, 1960'lı yıllarda ABD'de yapılan bire bir ölçekli yol testi sonuçlarına dayanmaktadır. Tasarım, tamamen deney sonuçlarına, diğer bir deyişle, deney yolunda kullanılan malzemelerin özelliklerine, yol üzerinden geçen taşıtların dingil konfigürasyonuna ve bölgenin iklim koşullarına bağlı olarak geliştirildiğinden, ampirik bir yöntemdir. Dolayısıyla, diğer bölgelerde, deney yolundan farklı malzemelerin kullanılması veya farklı dingil yüklemelerinin söz konusu olması durumlarında dikkatli olmak gerekmektedir.

Ancak, zamanla ağır taşıt trafiğinin artması, yeni malzemelerin yol inşaatında kullanılmaya başlaması ile birlikte, 1980'li yıllardan sonra, gelişmiş ülkeler (özellikle Avrupa ülkeleri) tarafından, analitik-ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Analitik-ampirik üstyapı tasarımı, diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi, uygulanan yükü ve malzemelerin mekanik özelliklerini (elastisite modülü, Poisson oranı, esneklik modülü vb.) dikkate alarak üstyapıda oluşacak, gerilme veya birim şekil değiştirmelerin hesaplanması esasına dayanmaktadır. Günümüzde, gelişmiş ülkelerin büyük bir çoğunluğu, kendi ülke koşullarına uygun analitik tasarım yöntemi geliştirmiş ve kullanmaktadır. Analitik-ampirik tasarım yöntemleri genel olarak üstyapı altında oluşan gerilmelerin veya birim şekil değiştirme miktarının sınırlandırılması ve taban zemini üzerinde oluşan basınç gerilmesinin veya düşey birim şekil değiştirmesinin sınırlandırılması esasına dayanmaktadır.

Üstyapıların tasarımı için kullanılan çeşitli **AASHTO** yayınları yıllardır çok iyi hizmet etmiştir. Bununla beraber bir çok ciddi sınırlamalar da mevcuttur:

- **Trafik yüklemelerindeki eksiklik:** 1960'lı yıllarda eyaletlerarası karayollarında üstyapı sistemlerinde üstyapı projelendirmesi kullanıldığından beri ağır kamyon trafik düzeyi çok büyük ölçülerde (yaklaşık 10 ile 20 kat) artış göstermiştir. Önceki eyaletlerarası karayolu üstyapılarının 5 ile 10 milyon eşdeğer tekil dingil yüküne göre dizayn edildiği yerde, günümüzde 50 ila 200 milyon belki de daha fazla dingil yükü için dizayn edilmesi gerekmektedir. Mevcut AASHTO tasarım kılavuzu bu trafik düzeylerinin güvenli bir şekilde tasarımında kullanılamamaktadır. Yol test üstyapıları, modern üstyapılarının kullanıma başlandıktan sonra gelecek bir kaç yıl içinde karşılaşacaklarından da az olan 1 milyon dingil yükünün üzerine kadar güçlendirilmiştir ve daha önceki AASHTO yol test verilerinin analiz regresyonlarına dayanan eşitlikler oluşturulmuştur. Bu nedenle, prosedürün modern trafik akımlarına uygulanması tasarımcının tasarım metodolojisinin çok ötesindeki veri ve prosedüre temel olan deneyimleri yolumlayarak tahmin etmesi anlamına gelmekteydi. Açıkça, tasarımcıların yüksek trafikli projelerde ulaştığı sonuçlar karanlıkta kalmaktaydı. Bu durum da projelerde tasarım-altı veya tasarım-üstü sonuçların ortaya çıkarak önemli ölçüdeki ekonomik kaybı beraberinde getirebiliyordu.

- **Rehabilitasyon eksiklikleri:** AASHTO yol testlerinde rehabilitasyon tasarım prosedürleri göz önünde bulundurulmamıştır. 1993 kılavuzu, özellikle ağır trafiğin söz konusu olduğu durumlarda, tamamen ampirik ve sınırlıdır. Günümüzdeki projelerin çoğunun rehabilitasyon tasarımlarını içerdiğinden de anlaşılabilceği gibi, başlıca ekonomik kayıplar, günümüzün karayolu trafik ihtiyaçlarını sağlayacak rehabilitasyon tasarımı yeterliliği geliştirilmedikçe devam edecektir. Geliştirilmiş rehabilitasyon tasarımları ile daha uzun ömürlü ve maliyet etkinliği (maaliyet-fayda) daha fazla olan rehabilite edilmiş üstyapılara olanak tanıyacaktır.

- **İklimsel etki eksiklikleri:** AASHTO yol testlerinde yalnızca spesifik bir coğrafi bölge göz önüne alındığından dolayı, farklı iklimsel koşulların üstyapı performansı üzerindeki etkilerinin ortaya konması mümkün değildir. Örneğin; yol testinde bahar ayları boyunca ortaya çıkan erime periyodu sebebiyle oluşan önemli ölçüdeki bozulmalar, ülkenin büyük bir kısmında görülmemektedir. Bir proje sahasındaki iklimsel etkilerin direkt olarak göz önünde tutulması üstyapı performansını ve güvenilirliğini artırır.

- **Taban zemini eksiklikleri:** Yol testinde bütün kesimler için tek tip taban zemini kullanılmıştır; fakat, karayolu üstyapılarında farklı performanslara sebep olabilecek birçok taban zemini tipi mevcuttur. Daha yeterli sınıflandırma, geliştirilmiş performans ve güvenilirlik ile sonuçlanan üstyapı strüktürünün tasarımını geliştirmek mümkündür.
- **Kaplama malzemesi eksiklikleri:** Yol testinde yalnızca bir asfalt betonu karışımı veya yalnızca bir portland çimentosu betonu karışımı kullanılmıştır. Günümüzde, etkileri tamamiyle göz önünde bulundurulabilecek birçok farklı tipte sıcak karışım asfalt betonu ve portland çimentosu betonu karışımları (örneğin; superpave, stone-mastic asfalt, yüksek dayanımlı portland çimentosu betonu) mevcuttur.
- **Temel tabakası eksiklikleri:** AASHTO yol testindeki temel esnek ve rijit üstyapı kesimleri yalnızca iki yoğun gradasyonlu temel/alttemel malzemelerini içermektedir. Bu; donma ve erozyondan dolayı, kayda değer ölçüde modül kaybı sergilemektedir. Günümüzde; özellikle ağır trafik yüklemeleri için, çeşitli stabilize tipler rutin olarak kullanılmaktadır.
- **Kamyon sınıflandırma eksiklikleri:** Taşıt süspansiyonları, dingil konfigürasyonları ve tekerlek tipi ile basınçları 1950'li yılların sonunda kullanılanların tipik örneğidir. Bunlardan birçoğu günümüz şartlarını yansıtmadığı (80 psi tekerlek basıncına karşılık 115 psi tekerlek basıncı) için bu yükleri taşıyamayacak yetersiz üstyapı tasarımları ile sonuçlanmaktadır.
- **Yapım ve drenaj eksiklikleri:** Üstyapı tasarımları, malzemeleri ve yapımı bunların kullanıldığı zamandaki yol testinin tipik örnekleridir. Yol test kesimlerinde alt-drenaj göz önünde bulundurulmamıştır, ama birçok olumlu etkisi bulunan alt-drenaj günümüzde geleneksel hale gelmiştir.
- **Tasarım ömrü eksiklikleri:** Kısa süreli yol testi nedeniyle, iklimin ve malzeme yaşlanmasının uzun dönemli etkileri dikkate alınmamıştır. Günümüzdeki üstyapıların birçoğunun tasarım ömrü 20 ile 50 yıl arasında iken, AASHTO yol testi 2 yıl süre ile yürütülmüştür. Yeniden kullanım etkisinin malzeme tepkisi üzerindeki etkisi ve yaşlanmanın direkt olarak göz önünde bulundurulması geliştirilmiş tasarım ömrü güvenilirliği ile sonuçlanır.
- **Performans eksiklikleri:** AASHTO 1986 tasarım güvenilirliğini göz önünde bulunduran geçerliliği onaylanmamış bir prosedürü içermektedir. Bu prosedür arzu

edilen bir tasarım güvenilirliğini elde etmek için büyük bir tasarım trafik yükü çarpanı ile sonuçlanmıştır (örneğin; 50 milyon eşdeğer tekil dingil yükü için tasarlanan bir üstyapı aslında 228 milyon eşdeğer tekil dingil yükü için tasarlanmış olmaktadır). Çarpan, tasarım güvenilirliği düzeyi ile büyük bir oranda artmıştır ve daha ağır trafik yüklü üstyapılar için aşırı tabaka kalınlıkları ile sonuçlanabilmektedir.

Daha önceki prosedürlerde üstyapı performansı hizmet edebilme ile sunulmuştur ve bunu etkileyen ağırlıklı faktör boyuna profildir. Son zamanlarda, birçok kesimde üstyapı yöneticileri; üstyapıda aşırı yüklemeler nedeniyle oluşan bozuklukların sürüşten ayrı bazı faktörlerin- çatlama, tekerlek izi ve derz bozulmaları gibi- üstyapı rehabilitasyonunun hizmet etkinliği (maliyet-fayda) zamanlamasına etki ettiğini ortaya koymuşlardır. Tasarım güvenilirliğinin geliştirilmesi ve nitelikli yönetim gerekliliklerinin karşılanması için, yönetim kriterinin ve üstyapı tasarım prosedürünün ölçülmüş olan aynı performans faktörleri ile ilişkili olması gerekir. Tasarım kılavuzu esnek ve rijit üstyapılardaki bu problemlerin hafifletmede yardımcı olması için anahtar bozulma tiplerini ve üstyapıda düzgünlüğünün veya sürüş kalitesinin ölçüsü olan Uluslararası Pürüzlülük İndeksini (International Roughness Index-IRI) kullanmaktadır.

AASHTO 1986 kılavuzunun geliştirilmesi sırasında gelecekteki tasarım prosedürlerinin mekanistik-ampirik prensiplere dayanacağını farkına varılmıştı. Ancak, böyle bir yaklaşım için tasarım mühendislerinin artan hesaplama eforunu ve gerekli hesaplamaları pratik hale getirecek bilgisayar teknolojisine olan ihtiyaçları o zaman için karşılanamamıştı. Günümüzdeki kişisel bilgisayarlar mekanistik yaklaşımı olağan kılan hesaplama gücüne sahiptir.

Yukarıda açıklanan eksiklikleri gidermek amacıyla 2004 yılında NCHRP 1-37A Projesi adı altında son tasarım kılavuzu yayınlanmıştır ve aşağıda bu tasarım kılavuzundaki “Yeni veya Yeniden İnşa Edilen Rijit Üstyapıların Tasarımı” ile ilgili bölüm sunulmuştur.

8.1 Giriş

Bu bölüm yeni veya yeniden inşa edilecek derzli donatısız tipteki rijit üst yapıların (JPCP) ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapıların (CRCP) mekanistik-ampirik tasarım prosedürlerini anlatmaktadır. Tasarım süreci tasarımcı tarafından yinelemeli

(iteratif) bir yaklaşımlı gerektirmektedir. Tasarımcı bir deneme tasarımı seçmeli ve daha sonra seçilen bu tasarımın belirlenen performans kriterini karşılayıp karşılayamayacağını belirlemek için ayrıntılı olarak analiz etmelidir. Bu tasarım kılavuzunda dikkate alınan performans ölçütleri derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar için derz bozulmalarını ve enine çatlakları, sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar için zımbalama etkilerini (punchoutları) ve her iki üst yapı tipi için uluslararası pürüzlülük indeksini (IRI) içermektedir. Eğer deneme tasarımı verilen bir güvenilirlik düzeyinde memnun edici performans kriterlerini sağlamıyorsa, tasarım gerekli kriterleri sağlayıncaya kadar modifiye edilmeli ve yeniden analiz edilmelidir. Seçilmiş bir güvenilirlik düzeyindeki uygulanabilir performans kriterlerini karşılayan tasarımlar daha sonra yapısal ve fonksiyonel özelliklerine göre fizibilite bakımından değerlendirilir. Bu özelliklere ilave olarak; ömür-döngü maliyet analizi (LCCA) ve çevresel etkiler gibi diğer değerlendirmeler de göz önünde tutulabilir.

Bu bölüm derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar için tasarım prosedürünün ayrıntılı bir tanımlamasını sunmaktadır. Aynı zamanda bu bölümde derzli donatısız tipteki rijit üst yapıların ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapıların tasarımına etki eden faktörler için duyarlılık analizleri de bulunmaktadır. Bunun yanında performans kriterlerini karşılamayan belirli tasarımlarda yapılması gereken değişiklikler için de önerilerden söz edilmiştir.

Bu bölümde anlatılacak olan prosedürler yeni geçki üzerindeki derzli donatısız tipteki rijit üst yapıların ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapıların tasarımı için veya mevcut üstyapıların yeniden inşası için kullanılabilir. Yeni geçki veya yeniden inşa için üst yapı tasarımlarında izlenen yollarda temel farklılıklar bulunmamaktadır. Bununla birlikte yeniden inşa için pratik bir bakış; mevcut üstyapılardan elde edilecek malzemelerin yeniden kullanım potansiyeli göz önünde tutulması gereken önemli bir konudur. Bu tasarım kılavuzunda anlatılan prosedürlerin kullanımıyla, yeni üst yapıların modifiye edilmiş çeşitli tabakalarında mevcut üstyapıdan elde edilen malzemelerin kullanımının etkileri değerlendirilebilmektedir.

8.2 Tasarım Sürecine Genel Bir Bakış

Derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar için ayrıntılı iteratif tasarım süreçleri sırayla Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 de görülmektedir. Tasarım sürecinin içerdiği ana adımlar şöyledir:

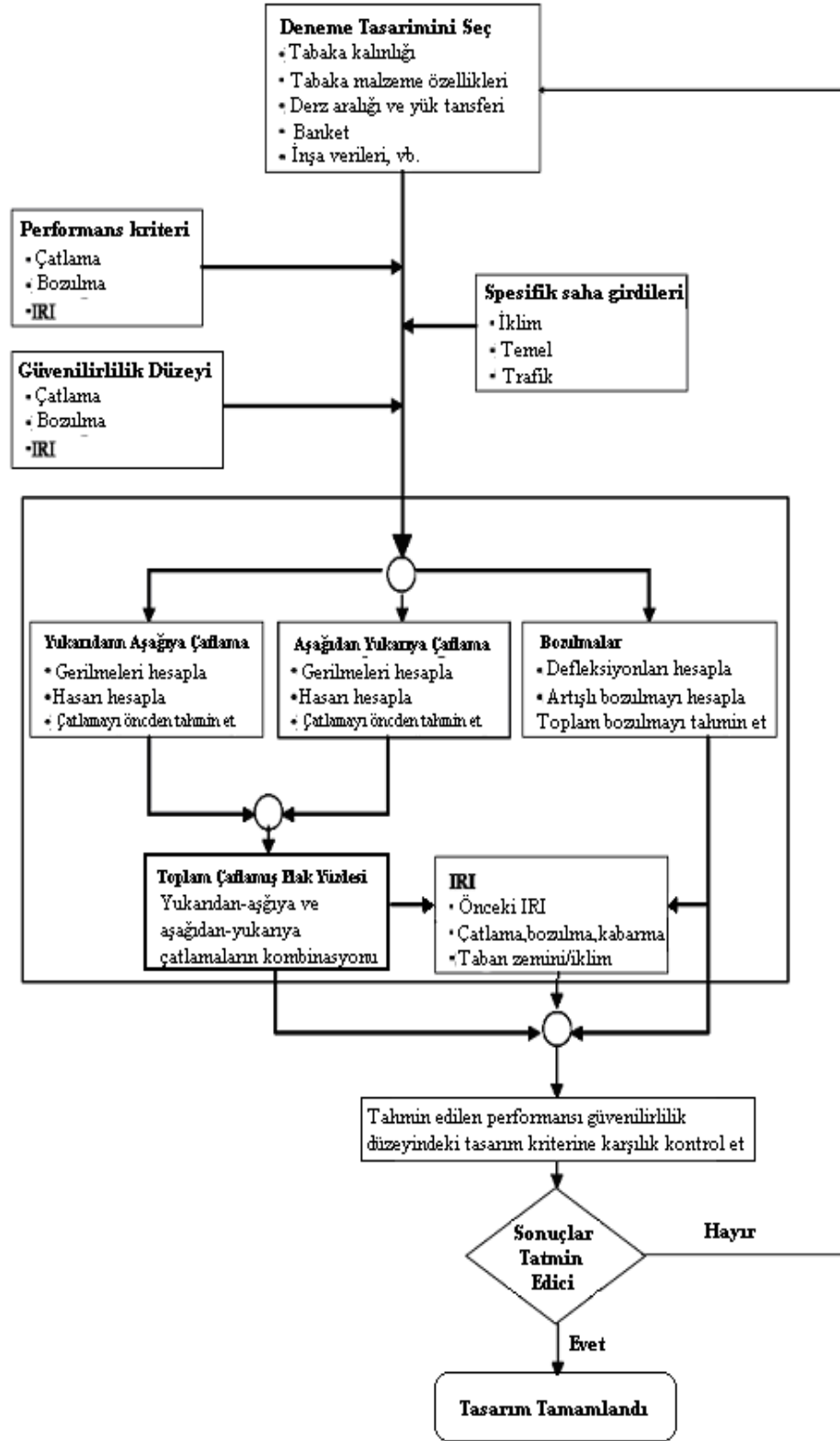
- 1- Trafiği, iklimi ve temel tabakasını içeren özel saha koşulları için bir deneme tasarımı düzenlenir. Bu deneme tasarımında tabaka düzeni, portland çimentosu betonu (PCC) ve diğer üst yapı malzemelerinin özellikleri ve tasarım ile inşa özellikleri tanımlanır.
- 2- Tasarım periyodu sonunda kabul edilebilir üstyapı performansı için gerekli kriterler saptanır (örneğin; derzli donatısız tipteki rijit üst yapılar için kabul edilebilir bozulma seviyeleri ve çatlama, sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar için zımbalama etkisi ve her ikisi için de uluslar arası pürüzlülük indeksi)
- 3- Her bir kabul edilebilir performans göstergesi için arzu edilen güvenilirlik düzeyi seçilir (örneğin; derzli donatısız tipteki rijit üst yapılarda çatlama, kırılma ve uluslar arası pürüzlülük indeksi için tasarım güvenilirlik düzeyinin seçilmesi)
- 4- Aşağıdakilerin tamamlanması için tasarım kılavuzu yazılımından yararlanılır;
 - a- Tüm tasarım periyodu için tasarım değerlendirmesi ihtiyaç duyulan trafik, malzeme ve iklim aylık girdi değerlerinin elde edilmesi için süreç girdileri,
 - b- Tasarım periyodu boyunca her bir dingil tipi ve yükü için ve her bir hasar-tahmin artış miktarı için; hızlı çözüm modellerine dayanan sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapısal tepkilerin (gerilmeler ve defleksiyonlar) hesaplanması,
 - c- Tüm tasarım periyodunun her bir ayında toplam hasarın hesaplanması,
 - d- Tasarım periyodu boyunca her bir ay için, tasarım kılavuzunda sunulan kalibre edilmiş mekanistik-ampirik performans modelleri kullanılarak üstyapıda aşırı gerilmeler nedeniyle oluşan temel bozuklukların (derz bozulmaları, plak çatlama, sürekli donatılı rijit üst yapılarda zımbalama etkisinin) önceden tahmin edilmesi,

e- Başlangıçtaki uluslar arası pürüzlölük indeksinin fonksiyonu olarak düzgünlüğün, zamanla üstyapıda aşırı gerilmeler sonucu oluşacak bozulmaların ve her bir zaman artımı sonunda saha faktörlerinin önceden tahmin edilmesi,

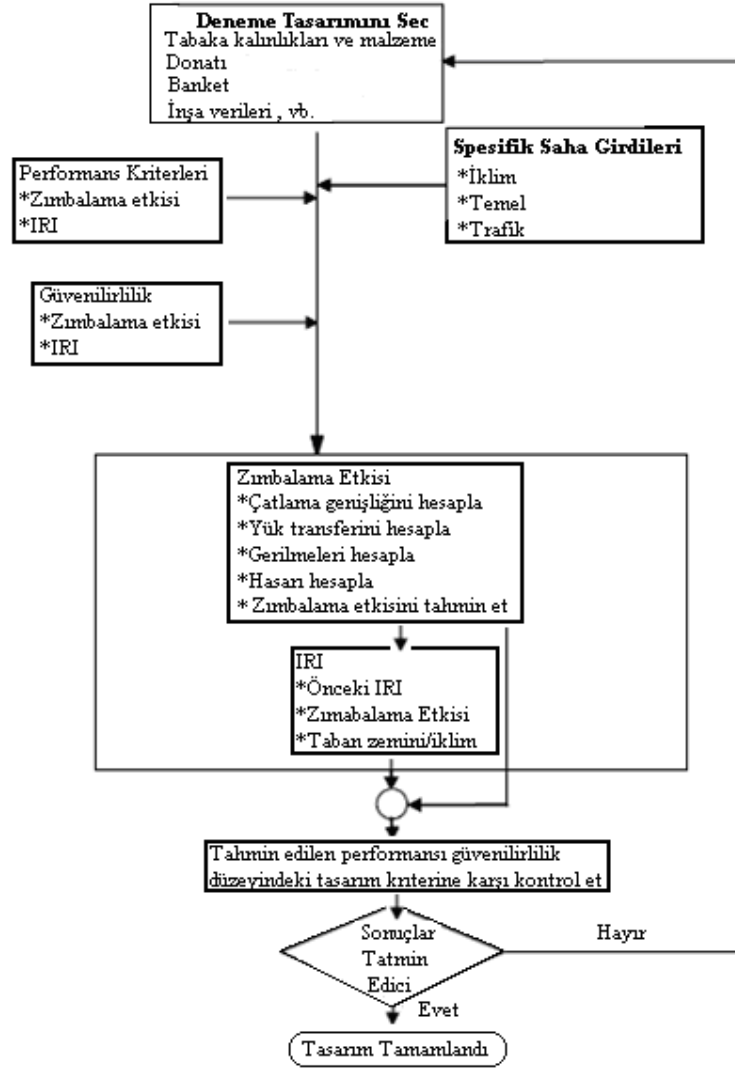
5- Yeterlilik için verilen güvenilirlik düzeyindeki deneme tasarımının beklenen performansının değeriendirilmesi,

6- Belirlenen kriterler karşılanıncaya kadar tasarım modifiye edilir ve 4. ile 5. adımlar tekrarlanır.

Belirlenen güvenilirlikteki hedef performans kriterini sağılayan tasarımlar yapısal ve fonksiyonel bakış açılarından yapılabilir olarak göz önünde bulundurulur ve buna ilave olarak ömür-döngü maliyet analizi gibi diğeri değeriendirmeler bakımından da incelenir.



Şekil 8.1: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların genel tasarım süreci [15]



Şekil 8.2: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım süreci [15]

8.2.1 Tasarım Girdileri

Tasarım prosedürü Şekil 8.3'te görüldüğü gibi yapısal tabaka, geniş bir çeşitlilikteki tabaka düzenlemelerini ve derz aralıklarını, kayma donatılarını, portland çimentosu betonundan oluşan bağlanmış banketleri, genişletilmiş plakları, temel tiplerini ve drenajı içeren tasarım özelliklerini dikkate alabilecek kapasiteyi sunmaktadır.

8.2.1.1 Deneme Tasarımı Girdileri ve Saha Koşulları

Analiz periyodu süresince performans kriterlerini (örneğin; derz bozulmaları, plak çatlamaları, zımbalam etkisi, uluslar arası pürüzlülük indeksi) sağlayan bir tasarımın saptanabilmesi için deneme tasarımının detaylı olarak iteratif bir şekilde analiz

edilmesiyle tasarım tamamlanır. Bir deneme tasarımı; üstyapı tabakalarını, derz tasarımını, donatı tasarımını ve malzeme özelliklerini içeren, kılavuzda daha önce verilen tasarım değerlendirmelerinin yerine getirilebilmesi için gerekli olan detayları içermektedir.

Deneme tasarımına ek olarak, tasarımcının; taban zemini özellikleri, trafik ve iklim verilerini içeren proje sahası koşulları için girdileri sunması gerekir. Bununla birlikte başlangıçtaki düzgünlük (başlangıçtaki uluslararası pürüzlülük indeksi), portland çimentosu betonuyla kaplama yapılacağının tahmin edildiği ay, üstyapının trafiğe açılmasının beklendiği ay ve rijit plakta tahmin edilen kalıcı kıvrılma/eğrilme gibi inşa ile ilgili birçok tasarım girdileri de bulunmaktadır.



Şekil 8.3: Olası üstyapı tabaka sisteminin gösterimi [15]

Yeterli tasarım girdilerinin elde edilmesindeki başlıca zorluk istenen özel proje bilgilerinin tasarım süreci sırasında genellikle elde edilebilir olmamasıdır ve inşanın ilerisindeki birkaç yıl için tahmin yapılması gerekmektedir. Bir projede kullanılacak malzeme bile inşanın başlamasına birkaç hafta kalıncaya kadar bilinemeyebilmektedir. Olabildiğince gerçekçi bir tasarımın elde edilmesi için, tasarımcının; mümkün olan en ayrıntılı malzeme özelliklerini, trafik özelliklerini ve tasarımda kullanılacak diğer tasarım girdilerini elde etmesi gerekir. Tasarımcının aynı zamanda en çok hangi girdilerin üstyapı performansını etkilediğinin saptayabilmesi için bir duyarlılık analizini de yürütmesi gerekir. Temel tabakası malzemesi özelliklerinin (örneğin; portland çimentosu betonu termal genleşme katsayısı) sıkı kalite kontrolü için duyarlılık analizine dayanan sonuçlar, hazırlıklar

sözleşme dökümanlarında yapılabilmektedir veya üstyapı performansının girdi sorularına (örneğin; plak derz aralığı) karşı duyarlılığın azaltılması için tasarım modifiye edilebilmektedir.

8.2.1.2 Tasarım Girdi Düzeyleri

Birçok tasarım girdisi için, tasarımcı birçok veri kalite düzeyi seçebilmektedir. Bunlar genellikle üç grupta olmak üzere aşağıdaki gibi anlatılmaktadır;

Düzy 1: Proje için saha ve/veya malzeme girdilerinin direkt olarak testlerden ve ölçümlerden elde edilmesi. Düzy 1'in örnekleri; laboratuvar testleri ile elde edilen malzeme özelliklerini ve proje sahasında veya yakınlarında ölçülen trafik hacim ve ağırlıklarını içermektedir.

Düzy 2: Gerekli girdilerin saptanmasında veya tayin edilmesinde karşılıklı ilişkilerin (korelasyonların) kullanımı. Düzy 2'nin örnekleri; ampirik metotlar kullanılarak belirlenen taban zemini esneklik modülünü (resilient modulus) veya California taşıma oranıyla (CBR) tahmin edilen bağlayıcısız temel malzemelerini veya ampirik korelasyonlar kullanılarak belirlenen R-değerlerini içermektedir.

Düzy 3: Girdilerin tanımlanmasında uluslararası varsayım değerlerinin ve bölgesel deneyimlerin kullanılması. Düzy 3 girdilerine örnekler; tipik bir esneklik modülünün belirlenmesinde AASHTO zemin sınıflandırmasının veya normalleştirilmiş dingil ağırlıklarının ve kamyon kategorilerinin dağılımının tayin edilmesi için AASHTO yol tipi ve kamyon tipi sınıflandırmalarının kullanımını içermektedir.

Girdi düzeyleri, girdi parametresinden girdi parametresine göre değişim gösterebilmektedir. Örneğin; taban zemini esneklik modülü bir laboratuvar testinden (Düzy 1) ve trafik dingil yük dağılımı uluslararası verilerden (Düzy 3) elde edilebilir. Spesifik bir parametre için girdi düzeyi seçimi birkaç faktöre göre değişim göstermektedir. Bunlar:

- Verilen bir girdi için üstyapı performansının bu girdiye olan duyarlılığı,
- Projenin kritikliği,
- Tasarım süreci sırasında elde edilebilir bilgiler,
- Tasarımcının girdileri elde etmesi için var olan kaynaklar ve zaman,

Çeşitli tasarım parametreleri için girdi düzeyleri tasarım kılavuzunun ikinci bölümünde tanımlanmıştır. Bununla birlikte, her bir girdi parametresi için seçilen düzeyin; proje tasarımı, maliyetler ve güvenilirlik üzerinde kayda değer bir etkisi olabilmektedir. Verilmiş bir proje için hangi parametrelerin daha titizlikle belirleneceğinin karar verilebilmesi için duyarlılık analizi kullanılabilmektedir.

8.2.1.3 Tasarım Analizi Periyodu Süresince Girdilerin İşlenmesi

İşlenmemiş tasarım girdileri, tasarım değerlendirmeleri sırasında ihtiyaç duyulan trafik, malzeme ve iklim girdilerinin aylık değerlerinin elde edilebilmesi için yazılım tarafından işlenir. Bu aylık girdiler şunlardan meydana gelmektedir: Analiz periyodunun her bir ayı için her bir dingil ağırlığı kategorisindeki; tekil (single), ikili (tandem), üçlü (tridem) ve dördü (quad) dingillerin saatlik ortalama sayısı,

- Elde edilebilir iklim verilerinin her saat için, portland çimentosu betonu tabakasındaki eşit olarak aralıklandırılmış on bir düğüm noktasındaki sıcaklıklar. Minimum bir yıllık hava istasyonu verilerine ihtiyaç duyulur.
- Her bir takvim ayı için ortalama aylık bağıl (nispi) nem (aynı sıcaklıktaki belli hacimdeki hava, buhar karışımındaki nem ağırlığının, maksimum su buharı ağırlığına oranı,
- Analiz periyodunun her bir ayındaki, portland çimentosu betonu dayanımı ve modülleri,
- Temel tabakasının aylık ortalama modül değerleri,
- Taban zemini esneklik modülüne (işlenmemiş tasarım girdisi) dayalı olarak elde edilen ortalama efektif taban zemini reaksiyonu modülü (k- değeri).

Kılavuzda, ikinci bölüm, dördüncü kısımda trafik hesaplamalarının detayları tanımlanırken, üçüncü kısımda ise iklimsel hesaplamaların detayları toplanmıştır.

Portland çimentosu betonu tabakasında aylık tabaka modülleri ve saatlik sıcaklık profilleri, tasarım kılavuzu yazılımının bir parçası olan Geliştirilmiş Entegre İklimsel Modelin (Enhanced Integrated Climatic Model-EICM) kullanımıyla elde edilir. Portland çimentosu betonu plak, bitüm ile stabilize temel, çimento ile stabilize temeller, çimento ve kireç ile iyileştirilmiş diğer tabakalar, bağlayıcısız agrega temel/alt temel ve taban zemini tabakaları, tasarım prosedüründe ele alınan başlıca tabaka tipleridir. Kılavuzda; 2. bölüm, 2. kısım bu tabaka tiplerinin her biri için

gerekli olan malzeme girdilerini detaylı olarak tanımlanırken, üçüncü kısımda ise bu malzemelerden her birinin mevsimsel sıcaklık değişimlerinden ve nem koşullarından nasıl etkilendiğini belirtilmektedir.

Portland çimentosu betonu plağı boyunca sıcaklık ve nem değişimleri, tasarımda; “kalıcı” öge ve “geçici” (saatlik ve aylık) öge olarak direkt bir şekilde göz önünde bulundurulmaktadır.

- Portland çimentosu betonundan plak için, çatlama modeli kalibrasyon sonuçlarına dayalı olarak sabit bir kalıcı kıvrılma/eğrilme (plak boyunca efektif bir sıcaklık farklılığıyla modellenir) tahmin edilir.
- Plakta sıcaklık koşullarındaki değişimden kaynaklanan geçici kıvrılma, portland çimentosu betonu plakta saatlik sıcaklık profillerinin hesaplandığı EICM’nin kullanımıyla modellenir. Bağıl nemdeki değişimlerden kaynaklanan geçici eğilmeler bölüm 8.4’te tanımlandığı gibi aylık eş değer sıcaklık farklılığına çevrilir ve geçici kıvrılma etkilerine eklenir.

Uzun-dönemli portland çimentosu betonunun dayanımındaki artış ve buna karşılık gelen portland çimentosu betonunun elastik modülündeki (E_c) değişimler rijit tasarım prosedüründe göz önüne alınmıştır. Portland çimentosu betonu dayanımı (kopma modülü, basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı) ve analiz periyodunu her bir ayı için elastik modül (E_c), ya direkt girdilere (Düzey 1), ya da varsayılan portland çimentosu betonu dayanımının artış modelinin kullanımına dayalı olarak saptanabilir. Yapısal tepkilerin hesaplanması ve hasar analizi için; EICM’den elde edilen mevsimlere göre ayarlanmış taban zemini ve diğer alt tabakalara ait modül değerleri ortalama aylık efektif k değerine çevrilir. Bu çevrim, tasarım kılavuzunun yazılım programında dahili olarak yapılır. Bu metodoloji bu kısımda daha sonra açıklanacak olan çevrimin yerine getirilmesi için kullanılır.

Girdilerin işlenmesi, tasarım kılavuzu yazılımında otomatikleştirilmiştir ve işlenmiş girdiler tüm tasarım periyodu boyunca aylık ölçüm ilkesi ile kritik üstyapı tepkilerinin hesaplanması için gerekli olan yapısal tepki modüllerinin hesaplandığı kısımda işlenir.

8.2.2 Yapısal Tepki Modeli

Trafik ve çevresel yüklerin etkisi altında gerilme ve defleksiyonlar gibi rijit üstyapı tepkilerinin hesaplanmasını kapsayan birçok mühendislik probleminin çözümünde, sonlu eleman analizinin güvenilebilir olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, bu tasarım kılavuzunda benimsenen artımlı tasarım prosedürü uzun süreli bir tasarım periyodu boyunca aylık hasarların (farklı yükler, yük pozisyonları ve eş değer sıcaklık farklılıkları için) hesaplanması için yüzbinlerce gerilme ve defleksiyon hesaplamalarını gerektirir. Mevcut sonlu eleman programı kullanılarak bu hesaplamaların tamamlanması günler almaktaydı. Bilgisayarda harcanan sürenin pratik bir düzeye indirgenebilmesi ve kritik gerilmeler ile defleksiyonların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için; ISLAB 2000 sonlu eleman (FE) yapısal modeline dayalı olan sinirsel ağlar (Neural Networks-NN_s) geliştirilmiştir. Bu yöntem; artımlı analizin her bir ay için detaylı olarak pratik bir zaman çerçevesinde (birkaç dakika) yürütülmesine olanak tanır. Direkt olarak sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçları tam olarak kopyalayan farklı analizler için bir dizi sinirsel ağlar geliştirilmiştir. Kılavuzda; Ek QQ'da sonlu eleman modelleri ve sinirsel ağlar ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

8.2.3 Artımlı Hasar Birikimi

Deneme tasarımının yeterliliğinin analiz edilmesi için, tasarım analizi periyodu trafiğe açılan aydan itibaren aylık zaman artışlarına bölünür.

- Trafik yükleri dingil tiplerine ve dingil yüklerine göre ayrılır. Dingil yükü artışları; tekil dingiller için 1000 lb (0.45 ton), tandem dingiller için 2000 lb (0.90 ton) ve tridem ile quad dingiller içinse 3000 lb (1.35 ton) dir.
- 2 °F lik artışlarla, hem pozitif (gündüz) hem de negatif (gece) vakitlerinde en yüksekten en düşüğe kadarki sıcaklık farklılıkları için, rijit plak boyunca; kalıcı ve geçici sıcaklık ve nem gradienti etkilerini içeren eşdeğer sıcaklık farklılıkları hesaplanır.

Her bir artım (her bir ay) içinde, üstyapı tepkilerini ve hasarlarını etkileyen tüm diğer faktörler sabit tutulur. Bunlar aşağıdakileri kapsamaktadır:

- Portland çimentosu betonu dayanımı ve modülleri,
- Temel modülleri,

- Taban zemini modülleri,
- Derz yük transferi (enine ve boyuna),
- Temel erozyonu ve desteklik kaybı (sürekli donatılı rijit üstyapılar için).

Böylelikle her bir artım içinde, bu artımda maruz kalınan hasarla birlikte kritik bir gerilme veya defleksiyon hesaplanabilmektedir. Tüm artımlar süresince hasar ve çıktılar, tasarım kılavuzu yazılımı aracılığıyla özetlenir.

8.2.4 Üstyapının Durumuna, Bozulma Etkenlerine ve Bakım Etkilerine Bağlı Olarak Gelecekteki Performansın Tahmini (Bozulma Tahmini)

Kısım 8.2.3'te tanımlandığı gibi hesaplanıp toplanan hasar üstyapı strüktürü içindeki yük ilişkili hasarların bir bağıl dizinini gösteren mekanistik bir parametredir “hasar” çok küçük (örneğin; 0,0001) olduğu zaman, üstyapı strüktüründe çatlama, kırılma veya zımbalama etkisi (punchout) gibi herhangi bir fiziksel bozulma beklenmeyecektir. Hesaplanan “hasar” ın kritik bir değere (örneğin; 0,1 veya daha büyük) artması durumunda; proje boyunca birkaç bölgede görülebilir bozulmaların gelişebileceği beklenilecektir.

Her bir ay için artımlı hasar toplanır ve hesaplanan hasarla üstyapıda aşırı gerilmeler sonucu oluşan gözlemlenebilir bozukluklar arasında ilişki kuran kalibre edilmiş modeller kullanılarak; enine çatlaklar, kırılmalar ve zımbalama etkisi (punchout) gibi fiziksel üstyapı bozulmalarına çevrilir. Şekil 8.4'te derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda alt-üst yorulma hasarı ile çatlamış plak yüzdesi arasında ilişki kuran bir örnek görülmektedir. Kalibre edilmiş bozulma tahmin modelleri; uzun dönemli üstyapı performansı (Long Term Pavement Performance-LTPP) veri tabanı ve çeşitli iklimsel koşullarda bulunan ve çeşitli trafik ile çevresel yüklemelere maruz kalan derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardan ve sürekli donatılı tipteki üstyapılardan elde edilen diğer uzun-dönemli üstyapı performans verileri kullanılarak geliştirilmiştir.

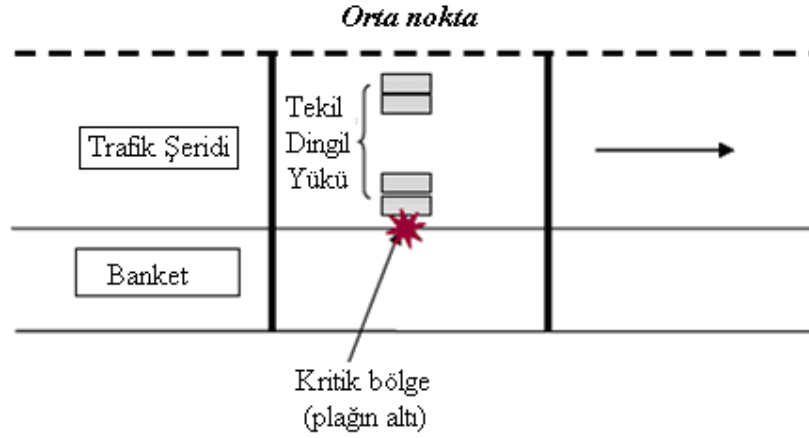


Şekil 8.4: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yorulma hasarı ile çatlamış plak yüzdesi arasındaki ilişki [15]

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için dikkate alınan bozulmalar rijit plaktaki yorulma ile ilişkili enine çatlaklar ve diferansiyel defleksiyonla ilişkili enine derz kırılmalarıdır. Plağın enine çatlaması; ya rijit plak yüzeyinin üzerinden başlayarak aşağıya doğru yayılır (Tap-down cracking) ya da tam tersi şekilde malzeme özellikleri, tasarım özellikleri ve inşa boyuncaki koşullar ile birlikte proje sahasındaki yük ve çevresel koşullara bağlı olarak rijit plağın aşağısından başlayarak yukarıya doğru (bottom-up cracking) yayılır. Tasarım kılavuzunda hem yukarıdan aşağıya olan ve hem de aşağıdan yukarıya doğru olan çatlamlar göz önüne alınmıştır. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için göze alınan en önemli yapısal bozulma zımbalama etkisidir. Bu farklı bozulmaların her biri için hasar birikimi farklı şekildedir ve dolayısıyla ayrı olarak dikkate alınmaları gerekir. Aşağıdaki kısımlar bu bozulmaların hasar birikim süreçlerini açıklamaktadır:

8.2.4.1 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılarda Aşağıdan-Yukarıya Enine Çatlamlar

Kamyon dingilleri plağın boyuna kenarlarının yakınındayken ve enine derzler ortasındayken, plağın altında Şekil 8.5'te görüldüğü gibi kritik bir çekme gerilme eğilmesi oluşur. Plak derinliğince yüksek bir pozitif sıcaklık gradiyentinin olması (plağın üstün plağın altından daha sıcaktır) durumunda, bu gerilme büyük oranda artmaktadır. Ağır dingil yüklerinin bu koşullar altındaki tekrarlı yüklemeleri er geç üstyapı yüzeyine doğru bir enine çatlak yayılması ile sonuçlanan, rijit plağın alt sınırı boyunca meydana gelen yorulma hasarını doğurur.



Şekil 8.5: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda aşağıdan yukarıya çatlamlar için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi. [15]

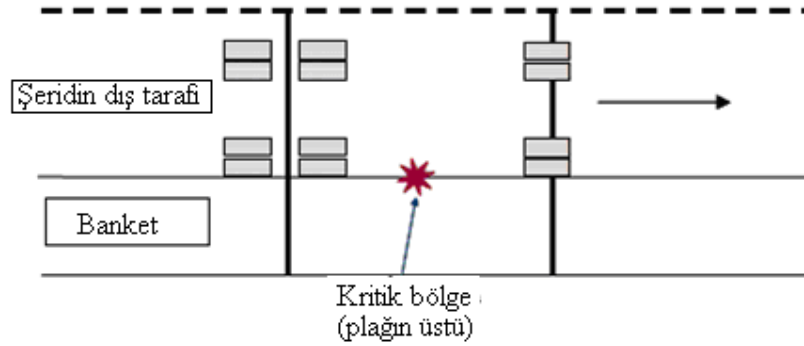
Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamlar zamanla kötüye gidebilir ve plak düzgünlüğünün kaybolmasına neden olur. Aşağıdan-yukarıya doğru yayılan enine çatlamların sınırlandırılmasındaki en etkili yöntemler şunları kapsamaktadır:

- Plak kalınlığının artırılması,
- Derz aralıklarının azaltılması,
- Genişletilmiş plakların kullanılması,
- Daha düşük termal genleşme katsayılı portland çimentosu beton karışımlarının kullanımı,
- Bağlanmış rijit banketlerin sağlanması,
- Daha yüksek dayanımlı portland çimentosu betonu karışımının kullanılması (daha yüksek portland çimentosu betonu elastik modülü, termal genleşme katsayı ve rötreden doğan karıştırılma sonuçları),
- Stabilize bir temelin kullanımı.

8.2.4.2 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılarda Yukarıdan-Aşağıya Enine Çatlamlar

Üstyapı yüksek negatif sıcaklık gradientlerine (plağın üstü, plağın altına göre daha soğuktur) maruz kaldığında, belirli dingil ağırlıklı ağır treyler çekicilerinden gelen tekrarlı yükler, üstyapı yüzeyinden başlayan enine veya diyagonal çatlamlarla sonuçlanan üstyapı yüzeyindeki yorulma hasarını doğurur. Yukarıdan-aşağıya çatlamlar kritik yükleme koşullarının plağın karşılıklı kenarlarını eş zamanlı olarak

yüklediği bir dingil kombinasyonunu gerektirir. Bir negatif sıcaklık gradiyentinin varlığında, Şekil 8.6’da görüldüğü gibi, bu tür yük kombinasyonları kritik sınır yakınındaki plağın yüzeyinde yüksek bir çekme gerilmesine neden olur. Bu tür yüklemelere, çoğunlukla; treyler çekicilerinin ve diğer araçların dingillerinin hareket ve geçiş kombinasyonları neden olur. Kısa treylerler ile serbest aks-dingillerine göre genellikle çoklu treylerler, yukarıdan-aşağıya çatlamlar için kritik yüklemelerin diğer kaynaklarıdır.



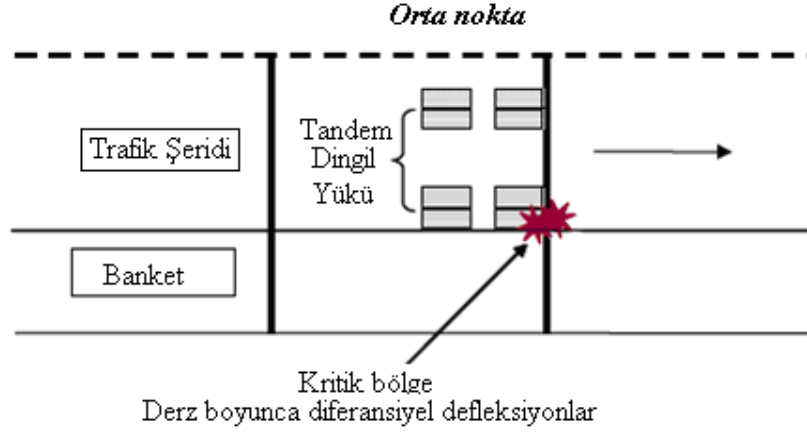
Şekil 8.6: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yukarıdan aşağıya çatlamlar için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi [15]

Kayda değer miktarda kalıcı yukarı doğru olan kıvrılma/eğrilme varlığı durumunda yukarıdan-aşağıya gerilmeler kritik hale gelir. Bu yüzden, yukarıdan-aşağıya çatlamlar en etkili şekilde şunlar aracılığıyla kontrol altında tutulur:

- Plak kalınlığının artırılması,
- Derz aralıklarının azaltılması,
- Bağlanmış rijit banketlerin sağlanması,
- Düşük termal genleşme katsayılı ve rötreli olan yüksek dayanımlı bir portland çimentosunun kullanımı,
- Stabilize bir temelin kullanımı,
- Betonun yerleştirilmesinden sonraki sabit kıvrılmaların azaltılması.

8.2.4.3 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılarda Derz Bozulmaları

Enine derzlerden geçen tekrarlı ağır dingil yükleri Şekil 8.7’de görüldüğü gibi derz bozulmaları için bir potansiyel yaratır.



Şekil 8.7: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bozulma analizleri için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi [15]

Bozulmalar çok ciddi bir hal alabilir ve sürüş kalitesinde kayba neden olabilir. Bunun yanında bu bozulmalar, şu koşullar oluşursa zamanından önce rehabilitasyon çalışmalarını gerektirebilir:

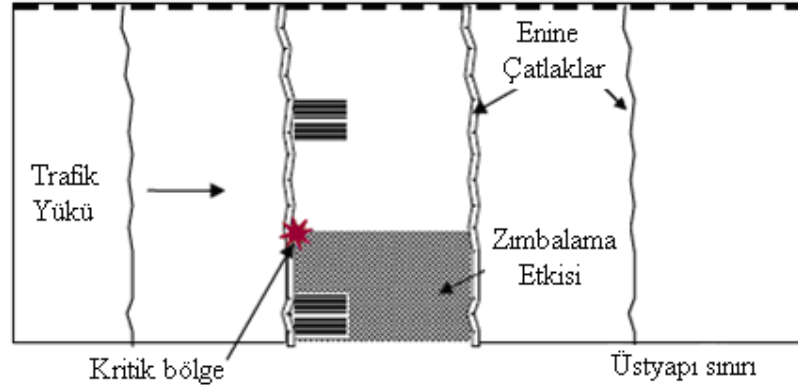
- Tekrarlı ağır dingil yükleri,
- Derzlerde zayıf yük transfer etkinliği (Load Transfer Efficiency-LTE),
- Derzin altında taşınabilir temel, alt temel veya taban zemini malzemesinin bulunmasıyla ortaya çıkan ince tanelerin pompajı,
- Derzin altında serbest suyun bulunma durumu,

Bu bozulmaların en etkili olarak kontrol altında tutulabilmesi şunları kapsamaktadır:

- Kayma donatılarının sağlanması,
- Kayma donatısı boyutlarının artırılması,
- Aşınmaya dirençli bir temelin sağlanması,
- Daha kısa derz aralıklarının oluşturulması,
- İri agrega özelliklerinin iyileştirilmesi (maksimum agrega boyutu vb.),
- Bağlanmış rijit banketlerin sağlanması,
- Alt-drenajın sağlanması (özellikle kayma donatısız üstyapılar için).

8.2.4.4 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılarda Zımbalama Etkisi

Birbirine yakın aralıktaki enine iki çatlak arasında plağın boyuna sınırı boyunca kamyon dingillerinin geçişi sırasında Şekil 8.8’de görüldüğü gibi üstyapının enine olarak bir yanından öbür yanına, kenardan biraz uzakta (1-1,5 m mesafede) plak yüzeyinde yüksek bir çekme gerilmesi meydana gelir. Plak kenarı boyunca desteklik kaybı veya enine çatlakların bir yanından diğer yanına yük transferinde kayıp olması bu gerilmeyi büyük oranda artırır.



Şekil 8.8: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi analizleri için kritik yük ve yapısal tepki bölgesi [15]

Ağır dingillerin tekrarlı yükleri, ilk başta enine çatlakları başlatıp plaktaki bir enine çatlaktan diğer çatlığa doğru boyuna doğrultuda yayılan mikro çatlaklarla sonuçlanan, plak üzerindeki yorulma hasarını doğurur (Şekil 8.8). Tasarım ömrü süresince plak kenarı boyunca meydana gelebilecek erozyon, çatlaklarda yük transfer etkinliğinin kaybı, nem ve sıcaklık gradiyentlerinin kalıcı ve geçici etkileri dikkate alınarak sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki zımbalama etkileri (punchout) önceden tahmin edilebilir. Enine çatlak genişliği, yük transfer etkinliği ve buna bağlı olarak zımbalama etkisi gelişimi üzerinde rol oynayan en kritik faktördür.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, zımbalama etkilerinin en etkili şekilde kontrol altında tutulması şunları kapsamaktadır:

- Boyuna donatı içeriğinin artırılması (çatlak genişliğini azaltır),
- Donatının orta-derinliğin üzerine yerleştirilmesi,
- Portland çimentosu betonunun termal genleşme katsayısının azaltılması,
- Plak kalınlığının artırılması,

- Bağlı banketlerin sağlanması,
- Stabilize bir temelin kullanılması,
- Betonun yerleştirilmesinden sonraki sabit kıvrılmaların azaltılması,
- Portland çimentosu dayanımının artırılması.

8.2.5 Düzgünlük (IRI) Tahmini

Tasarım periyodu boyunca, Uluslararası Pürüzlülük İndeksi ilk baştakine göre değişim gösterir. İnşa sırasında, ilk baştaki Uluslararası Pürüzlülük İndeksi ile üstyapı profili ve sonradan zamanla ortaya çıkan bozulmaların gelişimleri hesaplanır. Bu bozulmalar; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için enine plak çatlama ve derz bozulmalarını, derz kabarmalarını ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için zımbalama etkisini (punchout) içermektedir. Uluslararası Pürüzlülük İndeksi Modeli zamanla düzgünlükteki değişimlerin tahmini için bu tasarım kılavuzunda yer alan modeller ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için bir ampirik kabarma modelini kullanarak ve ilk baştaki Uluslararası Pürüzlülük İndeksi ile saha koşulları da göz önüne alınarak tahmin edilen bozulmaları kullanır. Rötrenin veya şişen zeminlerin dondan dolayı kabarma koşullarının sebep olduğu pürüzlülüğün hesaplanmasında dikkate alınan saha faktörleri, taban zeminini ve iklimsel faktörleri içine alır. Uluslararası Pürüzlülük İndeksi, tüm tasarım periyodu boyunca bir aylık artım ana ilkesi ile tahmin edilir.

8.2.6 Performans ve Tasarım Modifikasyonlarının Değerlendirilmesi

Fizibil bir tasarım, mekanistik tasarım prosedürü içinde yinelenmeli olarak elde edilir. Süreç şu adımları içermektedir:

- 1- Performans kriterinin saptanması (örneğin; çatlama düzeyi, kusurlar, bozulmalar, zımbalama etkisi ve çatlak genişliği ve tasarım periyodu sonundaki düzgünlük ile her biri için istenen güvenilirlik düzeyi),
- 2- Deneme tasarımının kurulması,
- 3- Tasarım ömrü boyunca performans tahmini,
- 4- Tasarım gerekliliklerine karşılık tahmin edilen performansın değerlendirilmesi,

- 5- Eğer tasarım kriteri tatmin edici değilse, tasarım gözden geçirilir ve tasarım gereklilikleri karşılanıncaya kadar 3. ve 4. adımlar tekrarlanır.

Her bir ayrı performans kriterini etkileyen ana tasarım faktörlerinden, bu bölümün 8.2.4. kısmında özetle bahsedilmiştir. Bunlar tasarımcıların; tüm tasarım gerekliliklerinin karşılandığı bir tasarımın elde edilmesi için gerekli ayarlamalar gerektiren temel faktörlerdir. Kısım 8.4'te derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için ve kısım 8.5'te sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için üstyapı performansının bu anahtar tasarım faktörlerinin duyarlılığını da içeren daha fazla detay sunulmuştur.

8.2.7 Tasarım Güvenilirliği

Tasarım ömrü boyunca trafik yüklerinin ve iklimsel faktörlerin uygulanmasında olduğu gibi üstyapı tasarım ve inşasında büyük oranda belirsizlikler ve değişkenlikler mevcuttur. Mekanistik-ampirik tasarımda ilgi duyulan anahtar çıktılar ayrı bozulma miktarlarıdır (örneğin; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için kırılmalar, enine çatlama ve düzgünlük). Bu yüzden tahmin edilen bozulmalar, ilgilenilen tasarım güvenilirliğindeki rastgele değişkendir. Ortalamanın tüm olası tahminleri için bu değişken varsayım dağıtımının nicelendirilmesi ve bununla ilişkilendirilen an, güvenilirlik fikirlerinin kapsamı içindedir. Bu tasarım kılavuzunda, tahmin edilen bozulma miktarı ile ilişkili olan değişkenlik, tahmin edilene karşılık sahadaki gerçek bozulma arasındaki farklılıkların özenli bir analizinden sonra, kalibrasyon sonuçlarına dayalı olarak tahmin edilir. Tasarım amaçları için ortalama tahmin etrafındaki verilmiş olan bir performansın değişiminin bilgisine dayalı olarak tasarım güvenilirliği tahmin edilir.

Ayrı üstyapı bozulma modelleri (örneğin; yukardan-aşağıya çatlama, aşağıdan-yukarıya çatlama, kırılmalar ve sürekli donatılı tipteki rijit üst yapılar için zımbalama etkisi) için tasarım güvenilirliği, kalibrasyon projesinden elde edilen her bir ayrı model tahminlerinin standart hatasına dayalı olarak hesaplanır. Bu hata tahminleri; bir girdi tahmin değişkenliğini inşa süreç değişkenliğini, hata modelini ve tam cevap hatasını kapsar.

İstenilen güvenilirlik düzeyi, bu tasarım kılavuzundaki bir üstyapı tasarımı için performans gerekliliklerinin tanımlanmasındaki tasarım ömrü sonunda kabul edilebilir bozulma düzeyi ile birlikte belirlenir. Örneğin; bir kriter; %90'lık tasarım güvenilirliğinde çatlamış plakları %10 ile sınırlandırabilmektedir. Bu yüzden eğer bir

tasarımcı 100 proje dizayn ettiyse, bunlardan 90'ı tasarım ömrünün sonunda %10'dan az plak çatlaması sergileyecektir. Aynı tasarım içinde farklı bozulmalar için farklı tasarım güvenilirliği düzeyi tanımlanabilir. Örneğin; tasarımcı, plak çatlaması için %95'lik güvenilirlik belirtilmesini seçebilir ama kırılma ve Uluslar arası Pürüzlülük İndeksi için %90'lık güvenilirliği tercih edebilir. Tabi ki tasarım güvenilirliğindeki artış, üstyapının ilk maliyetini de artıracaktır. Buna karşın, daha yüksek tasarım güvenilirlikleri için gelecekteki bakım maliyetleri daha düşük olacaktır.

8.2.8 Ömür-Döngü Maliyetleri Tahmini

Bir deneme tasarımı yapısal (bozulma) ve fonksiyonel (düzgünlük) gerekliliklerinden geçtikten sonra teknik olarak fizibil olan bir tasarım alternatifi halini alır. Bu noktada, üstyapı; ömür-döngü maliyeti ve diğer faktörler bakımından diğer fizibil tasarım alternatifleriyle karşılaştırma yapılabilmesi için analiz edilebilir. Ömür-döngü maliyeti için genel prosedür tasarım kılavuzunun Ek C bölümünde sunulmuştur. Bir ömür-döngü maliyet analizi içinde, tasarımcı tarafından belirlenen bakım ve rehabilitasyon politikası ile birlikte tasarım alternatiflerinin ortalama ömürlerinin tahmininde, fizibil tasarım alternatiflerinin önceden kestirilen bozulmaları ve Uluslararası Pürüzlülük İndeksi kullanılabilir.

8.3 Yeni Rijit Üstyapılar İçin Girdiler

Bu bölümde ortaya konan, yeni rijit üstyapıların tasarımında kullanılan girdi verileri şöyle sınıflandırılmıştır:

- Genel bilgiler,
- Saha/proje tanımlaması,
- Analiz parametreleri,
- Trafik,
- İklim,
- Drenaj ve yüzey özellikleri,
- Üstyapı strüktürü,
- Tasarım özellikleri.

Bu bilgilerin birkaçı (örneğin; trafik, iklim), kılavuzda Bölüm 3 Kısım 3’te söz edilen esnek üstyapı tasarımı için kullanılan girdilerle özdeşdir. Buna karşın derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda kullanılmaları için bu girdilerin nasıl işlendiklerine dair değişiklikler bulunmaktadır. Bu kısmın amacı, tasarım kılavuzu kullanılarak yapılan rijit üstyapı tasarımı için gerekli olan tüm girdilerin, bunların tasarım süreciyle nasıl ilişkileri olduğunu belirten uygun yorumlarla birlikte özetlenmiştir.

Bu tasarım girdilerinden birkaçı için, tasarım kılavuzundaki bölümlerde sunulan detaylı tanımlamalar aşağıdaki gibidir:

- BÖLÜM 2- Tasarım Girdileri, Kısım 1: Taban Zemini/Temel Tasarımı Girdileri
- BÖLÜM 2- Tasarım Girdileri, Kısım 2: Malzeme Nitelendirmesi
- BÖLÜM 2- Tasarım Girdileri, Kısım 3: Çevresel Etkiler
- BÖLÜM 2- Tasarım Girdileri, Kısım 4: Trafik
- BÖLÜM 3- Tasarım Analizi, Kısım 1: Drenaj

Girdilere uygulanabilir detaylı ana notlar için bu bölümlere başvurulmalıdır.

8.3.1 Genel Bilgi

Şu girdiler analiz periyodunu ve tasarım tipini tanımlamaktadır:

- Tasarım Ömrü-Beklenen üstyapı tasarım ömrü (yıl)
- İnşa Ayı- Detaylı bilgi için, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3’teki tanımlamalara bakılabilir. Haziran ayının seçilmesi inşanın 1 Haziran’da başlayacağı anlamına gelir ve tüm yaşlanmalar bu tarihe göre kurgulanır. Sıcak ayların seçilmesi, daha yüksek “0-gerilme” sıcaklıklarıyla ve daha geniş çatlak açılmalarıyla sonuçlanır. En elverişsiz aylar (portland çimentosu betonunda en yüksek “0-gerilme” sıcaklıklarının kazanılması ile sonuçlanan aylar) boyunca inşadan kaçınılması ile, erken üstyapı başarısızlık riski kayda değer derecede azaltılır.
- Trafiğe Açılış Ayı- Detaylı bilgi için, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3’teki tanımlamalara bakılabilir. Trafikğin uygulandığı üst yapıdaki portland çimentosu betonu dayanımını belirlemesinden dolayı, bu hassas bir

girdidir. Portland çimentosu betonu dayanımının, betonun yerleştirilmesinden sonra, ilk birkaç ay boyunca nispeten daha yüksek oranda artış gösterdiği göz önünde bulundurulmalıdır.

- Üstyapı Tipi- Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapı veya Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapı. Bu girdi, tasarım değerlendirme metodunu ve uygulanabilir performans modelini belirler.

8.3.2 Saha/Proje Tanımlanması

Bu grup girdiler şunları kapsar:

- Proje yeri,
- Proje tanımlanması-proje kimliği, saha kimliği, başlangıç ve son nokta arası mesafe ve trafik yönü,

8.3.3 Analiz Parametreleri

Tasarımcının göz önünde bulundurması gereken başlıca analiz parametreleri şöyle sıralanabilir:

8.3.3.1 Başlangıçtaki Uluslararası Pürüzlülük İndeksi

Başlangıçtaki pürüzlülük indeksi üstyapının inşa edildiği sıradaki düzgünlüğünü tanımlar. Bu parametre büyük oranda proje düzgünlük spesifikasyonlarına göre değişim göstermektedir ve üstyapının uzun dönemli sürüş kalitesi üzerinde kayda değer bir etkiye sahiptir. Tipik değerler 50 in/mi (0,79 mm/m) den 100 in/mi (1,58 mm/m) ye kadar değişmektedir.

8.3.3.2 Performans Kriteri

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı; enine çatlamalara, enine derz bozulmalarına ve üstyapı düzgünlüğüne (Uluslararası Pürüzlülük İndeksi) dayanmaktadır. Tasarımcı bu performans göstergelerinin birkaçını veya tümünü seçebilir ve bir tasarımı değerlendirmek için kriter tespit eder. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı için; çatlak genişliği ve yük transfer etkinliği, zımbalama etkisi ve düzgünlük anahtar performans göstergeleridir. Performans kriteri seçilirken, tasarım güvenilirliği de göz önünde tutulmalıdır. Örneğin; yüksek bir güvenilirlik

düzeyinin ve düşük bozulma düzeyinin belirlenmesi, çok konservatif bir tasarımla sonuçlanır.

8.3.3.3 Enine Plak Çatlamaları (Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar)

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı plaklarındaki çatlaklar er ya da geç düzgünlük kaybına neden olur. Enine çatlamaları kontrol altında tutamayan yetersiz tasarımlar, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda zamanından önce olan veya gelişen başarısızlıklarla sonuçlanmıştır. Bu yüzden, tasarım periyodu boyunca gerekli performans gösteren üstyapıların sağlanabilmesi için enine çatlakların sınırlandırılması gerekir.

Enine çatlamalar için performans kriteri, tasarım ömrü sonunda izin verilebilir maksimum çatlamış plak yüzdesini tanımlar ve tasarım periyodu boyunca oluşabilecek plak çatlama düzeyini belirler. İzin verilebilir enine çatlama düzeyi; tasarım periyodu boyunca plak çatlama miktarı için ayrı karayolu kurumlarının gösterdiği toleransa göre değişmektedir. Tasarım güvenilirliği ve yolun fonksiyonel sınıfına bağlı olarak izin verilebilir tipik çatlama değerleri %10 ile %45 arasında değişmektedir.

8.3.3.4 Enine Derz Bozulmaları (Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar)

Ortalama enine derz bozulmaları sürüş kalitesini etkileyen kritik bir faktördür. Bu yüzden, bir üstyapının tasarım periyodu boyunca düzgünlüğünü koruyabilmesinin sağlanması için ortalama enine derz bozulmalarının sınırlandırılması istenir. Derz bozulması için performans kriteri, tasarım ömrü sonundaki izin verilebilir ortalama derz bozulma miktarını tanımlar ve tasarım periyodu boyunca derz bozulma düzeyini saptar. Kabul edilebilir derz bozulma düzeyi ayrı karayolu kurumlarının pürüzlülük ve bakım politikalarına gösterdikleri toleransa göre değişim göstermektedir. Karayolunun fonksiyonel sınıfına ve tasarım güvenilirliğine göre, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda izin verilebilir ortalama bozulmaların tipik değerleri 0.1 in (0.25 cm) ile 0.2 in (0.5cm) arasında değişmektedir.

8.3.3.5 Çatlak Genişliği ve Çatlaklarda Yük Transfer Etkinliği

Soğuk havalarda, çatlak genişliği en kritik tasarım parametresidir. Daha geniş çatlaklarda yük transfer etkinliğinin kaybı daha olasıdır. Tasarım kılavuzu yazılımı, donatı derinliğindeki çatlak genişliğini hesaplamaktadır. Bunun 0,02 in (0.5 mm)

veya daha küçük değerlerle sınırlandırılması gerekir. atlaklarda yük transfer etkinliği; temel dayanım parametresidir ve çatlak genişliği ile uygulanan ağır dingillerin sayısına göre değişim göstermektedir. Tasarım mr boyunca çatlaklarda yük transfer etkinliğinin %95'ten daha büyük bir oranla sınırlandırılması gerekir.

8.3.3.6 Zımbalama Etkisi (Sürekli Donatılı Tipteki Rijit styapılar)

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için zımbalama etkisinin gelişimi başlıca başarısızlık şeklidir. Zımbalama etkisi, sürekli donatılı tipteki rijit styapılarda düzgünlük kaybının temel sebebidir. Zımbalama etkisi için performans kriteri tasarım ömrü sonunda her bir milde kabul edilebilir zımbalama etkisi sayısını tanımlar ve aynı zamanda tasarım ömrü boyunca gelişebilecek zımbalama etkisi sayısını saptar. Çoğunlukla düşük düzeyde hasar görmüş sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı modelinin kalibre edilmesi için kullanılan kesimlerde gözlemlenmiş olan zımbalama etkilerinin; 3 in (76.2 mm)'den daha dar olan kabarıp dökülme veya 0,25 in. (6.35 mm)'den kk kırılma şeklindeki iki enine çatlak arasında şekillenen ince bir boyuna çatlak olarak uzun dönemli üstyapı performansı aracılığı ile tanımlandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Böyle bir zımbalama etkisinin daha da öteye gidip ciddi bir hal alması muhtemelen birkaç yıllık trafiği gerektirecektir. Tasarım için zımbalama etkisi performans kriterinin seçimi bu düşük hasar koşullarını yansıtmalıdır. Karayolunun fonksiyonel sınıfına ve tasarım güvenilirliğine bağlı olarak değişen sürekli donatılı tipteki rijit styapılarda zımbalama etkisinin izin verilebilir zımbalama etkisi değerleri her mil için 10 ile 20 arasında değişmektedir.

8.3.3.7 Düzgünlük (Derzli Donatısız ve Sürekli Donatılı Tipteki Rijit styapılar)

Karayolunun fonksiyonel yeterliliği çok büyük sıklıkla üstyapı düzgünlüğü aracılığıyla ölçülür. Pürüzlü yollar sürücü rahatsızlığına yol açmakla beraber seyahat sürelerini ve taşıt işletim giderlerini (taşıt işletme maliyetlerini) artırır. Üstyapı bozulmaları açısından bir üstyapının strüktürel performansı ile birlikte karayolu kurumlarınca alınan rehabilitasyon kararlarının büyük bir bölümüne sıklıkla katkıda bulunan pürüzlü yollar aracılığı ile meydana gelen kamu şikayetleri bakımından da önem taşır. Basit bir anlamda düzgünlük “araçlarda yanal vibrasyona neden olan yüzey profilindeki değişim” olarak tanımlanabilir. Uluslar arası Pürüzlülük İndeksi (IRI) styapı yönetiminde düzgünlük ölçümünün en yaygın yoludur.

Yapısal bozulmalarda olduğu gibi, düzgünlük için performans kriteri tasarım ömrü sonundaki kabul edilebilir Uluslararası Pürüzlülük İndeksi tanımlar. Tasarımcı tarafından seçilen son Uluslararası Pürüzlülük İndeksi değerleri tasarım güvenilirliği düzeyini aşmamalıdır. Karayolunun fonksiyonel sınıfı ve tasarım güvenilirliğine göre kullanılan son Uluslararası Pürüzlülük İndeksinin tipik değerleri 150 in/mil (2.37 mm/m) ile 250 in/mil (3.95 mm/m) arasında değişmektedir.

8.3.4 Trafik

Trafik verisi, üstyapı strüktürünün analiz ve tasarımı için gerekli olan anahtar veri elemanlarından birisidir. Tasarım kılavuzunda BÖLÜM 2- Kısım 4’de detaylı olarak açıklandığı gibi, kamyon trafik yüklerini dingil yük grubu açısından göz önünde bulundurmaktadır. Tekil (single), çiftli (tandem), üçlü (tridem) ve dördü (quad) dingiller için tüm dingil yükü grupları göz önüne alınmıştır. Aylık süreler içinde tasarım kılavuzu yazılımı ile ortaya konan tasarım şeridindeki ağır kamyonların kümülatif sayı çıktısı kamyon trafik yüklerinin magnitudünün (HWA-Federal Highway Administration Sınıf 4 veya üzeri) temel göstergesidir. Bu parametre kamyon trafik yüzeyinin genel bir göstergesi olarak göz önüne alınabilmektedir. Örneğin, bir üstyapı; tasarım ömrü boyunca 1 milyon ağır kamyon veya 100 milyon kamyon taşıyacak olmasıyla tanımlanabilir.

Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımı için gerekli olan bir trafik veri özeti değişkenlerinin temel tanımlamaları ve bunlara ilişkin varsayılan değerlerle birlikte aşağıda sunulmuştur. Trafik girdilerine ilişkin detaylı tartışmalar ve önemli noktalar; kılavuzda, BÖLÜM 2- Kısım 4’te ortaya konmuştur.

8.3.4.1 Temel Bilgiler

- Temel yıl için Yıllık Ortalama Günlük Kamyon Trafiği-YOGKT (Annual Average Daily Truck Traffic-AADTT)-Trafik akımındaki ağır kamyonların (4. sınıftan 13. sınıfa kadar) toplam sayısı,
- Tasarım yönündeki kamyon yüzdesi (yön dağıtma faktörü)-bir yol diliminden geçen trafiğin yön sayısına bağlı olarak dağıtılmasında kullanılan katsayı,
- Tasarım şeridindeki kamyon yüzdesi (şerit dağıtma faktörü)-aynı yöndeki trafiğin şerit sayısına göre dağılımında kullanılan katsayı,

- Araçların işletim hızı (bir sürücünün verilen bir yol üzerinde, uygun hava ve etkin trafik koşulları altında, her kesim için tespit edilmiş olan güvenli proje hızını hiçbir zaman aşmamak şartıyla sağlayabildiği en yüksek genel seyahat hızı)-bu girdi bitüm bağlayıcı tabakaların modüllerinin hesaplanmasında kullanılır.

Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 4'te üç hiyerarşik düzeyin her birindeki bu girdilerin düzenlenmesi için önerilen prosedürler incelenmiştir. Yön ve şerit dağıtım faktörleri için 3. seviyedeki uluslar arası trafik çalışmalarına dayalı olarak varsayılan değerler sunulmuştur.

8.3.4.2 Trafik Hacmi Ayarlamaları

Trafik hacmi ayarlamaları; aylık ayarlama faktörlerini, taşıt sınıfı dağıtımını, saatlik kamyon trafiği dağıtımını, trafik büyüme faktörlerini ve dingil yükü dağıtım faktörlerini içine almaktadır.

- **Aylık Ayarlama Faktörleri**

Kamyon aylık dağıtım faktörleri, temel alınan yıl içinde kamyon trafiğindeki aylık değişimlerin saptanması için kullanılır. Basit anlamda bu değerler; aylık kamyon trafiğinin YOGKT'ne oranıdır. Doğal olarak, temel alınan yılın 12 ayı için bu oranların ortalaması 1.0'a eşit olmalıdır. Kılavuzda; BÖLÜM 2- Kısım 4'te aylık ayarlama daha detaylı olarak belirtilmiştir. Eğer elde edilebilir bilgi yoksa, düz dağıtım varsayılır (örneğin; bütün aylar için ve bütün araç sınıfları için 1,0).

- **Taşıt Sınıfı Dağıtımı**

Normalleştirilmiş taşıt sınıfı dağıtımı; temel alınan yıl için YOGKT içindeki her bir kamyon sınıfının (4. sınıftan 13. sınıfa kadar) yüzdesini gösterir. Tüm kamyon sınıflarının YOGKT yüzdeleri toplamı 100 e eşit olmalıdır. Kılavuzda BÖLÜM 2, Kısım 4'te; her bir girdi düzeyindeki bu girdinin saptanması incelenmiştir. Şunun gözden kaçırılmaması gerekir ki; eğer sahaya özgü (Düzey 1) veya bölgesel veri (Düzey 2) elde edilebilir değilse, kamyon trafik sınıflandırması (Truck Traffic Classification-TTC) karayolunun fonksiyonel sınıfı ile birlikte taşıt sınıfı dağıtımının tahmin edilmesinde kullanılabilir. Her bir kamyon trafik sınıflandırması; eşsiz kamyon trafik karakteristikleriyle beraber bir trafik akımını temsil eder ve varsayılan taşıt sınıfı dağıtımı, Düzey 3'teki uluslar arası trafik veri tabanının kullanımıyla

saptanmıştır. Varsayılan değerler, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 4 ve Ek AA'da sunulmuştur. Bunlar aynı zamanda tasarım kılavuzu yazılımının bir parçasıdır.

- **Saatlik Kamyon Trafiği Dağıtımı**

Saatlik dağıtım faktörleri, günün her bir saati içinde YOGKT'nin yüzdesine karşılık gelmektedir. Bu faktörler; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama ile kırılmanın veya sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisinin tahmini açısından büyük önem taşırlar. Performans tahmini için gerekli gündüz ve gece trafik akımlarının hesaplanmasında doğrudan yardımcı olmaktadır. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 4'te bu girdi daha detaylı olarak incelenmiştir ve üç girdi düzeyinden her biri için tahmin edilebilme yolları tanımlanmıştır.

- **Trafik Büyüme Faktörleri**

Trafik büyüme fonksiyonu, zamanla kamyon trafiğinde (geriye dönük veya ileriye dönük kamyon trafiği) artış veya azalmayı hesaba katmaktadır. Gelecekteki kamyon trafiği hacmini tahmin etmek için üç fonksiyon bulunmaktadır:

- Büyümenin olmadığı fonksiyonlar,
- Lineer büyümenin olduğu fonksiyonlar,
- Bileşik büyümenin olduğu fonksiyonlar.

Farklı büyüme fonksiyonları, farklı fonksiyon sınıfları için kullanılabilir. Seçilen fonksiyona, karayolunun trafiğe açılacağı tarihe (inşa trafiği hariç) ve tasarım ömrüne dayalı olarak gelecekteki trafik projelendirilir. Büyüme fonksiyonları kılavuzda; BÖLÜM 2-Kısım 4'te sunulmuştur.

- **Dingil Yüğü Dağıtım Faktörü**

Dingil yüğü dağıtım faktörleri, basit anlamda; her bir yük aralığı içindeki spesifik bir dingil tipi ve taşıt sınıfı (4. sınıftan 13. sınıfa kadar) toplam dingil yüğü uygulamalarını temsil etmektedir. Bu verinin, her bir ay için ve her bir taşıt sınıfı için sağlanması gerekir. Her bir dingil tipi için yük aralıkları aşağıda tanımlandığı gibidir:

- Tekil (single) dingiller- 3000 lb (1.36 ton) ile 41000 lb (18.6 ton) arasında (1000 lb (0.45 ton) lik aralıklarla),
- İkili (tandem) dingiller- 6000 lb (2.72 ton) ile 82000 lb (37.2 ton) arasında (2000 lb (0.9 ton) lik aralıklarla),

- Üçlü (tridem) ve dördlü (quad) dingiller- 12000 lb (5.4 ton) ile 102000 (46.3 ton) lb arasında (3000 lb (1.36 ton) lik aralıklarla).

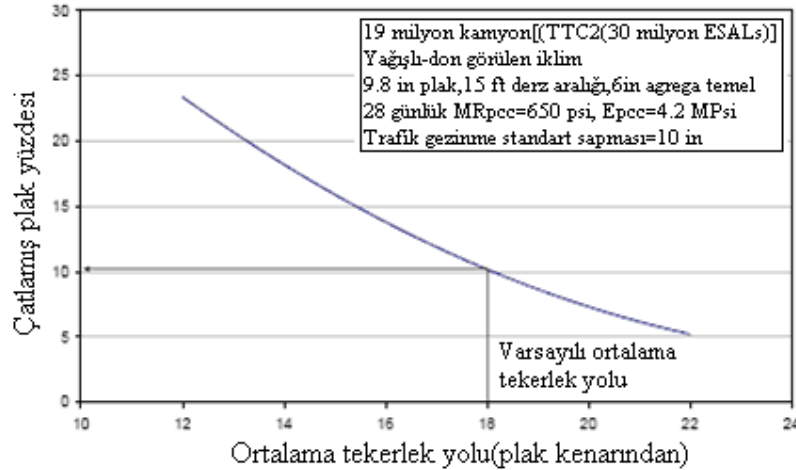
Farklı girdi düzeylerindeki girdi yükü dağıtım faktörlerinin tahmini kılavuzda; BÖLÜM 2-Kısım 4'te sunulmuştur.

8.3.4.3 Genel Trafik Girdileri

Bu kategori altındaki girdilerin büyük çoğunluğu, üstyapı tepkilerinin hesaplanması için dingil yükü konfigürasyonlarını ve yükleme detaylarını tanımlar. Trafik hacim hesaplamalarında kullanılan “Her Bir Kamyon Sınıfı Dingil Yüklerinin Sayısı” ve “Dingil Açıklığı” girdileri istisnalarlardır. Kılavuzda, BÖLÜM 2-Kısım 4'te detaylı olarak açıklanmış olan derzli donatısız tipteki rijit üstyapılara ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılara özgü ek incelemeler aşağıda sunulmuştur:

- **Ortalama Tekerlek Yolu**

Tekerleğin en dış kenarından yol şerit çizgilerine olan mesafe. Bu girdi; hem derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardaki çatlamlar için hem de sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki zımbalama etkisi tahminleri için yorulma hasarının hesaplanmasında büyük önem taşır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların, ortalama tekerlek yerine olan duyarlılığı Şekil 8.9'da görülmektedir.



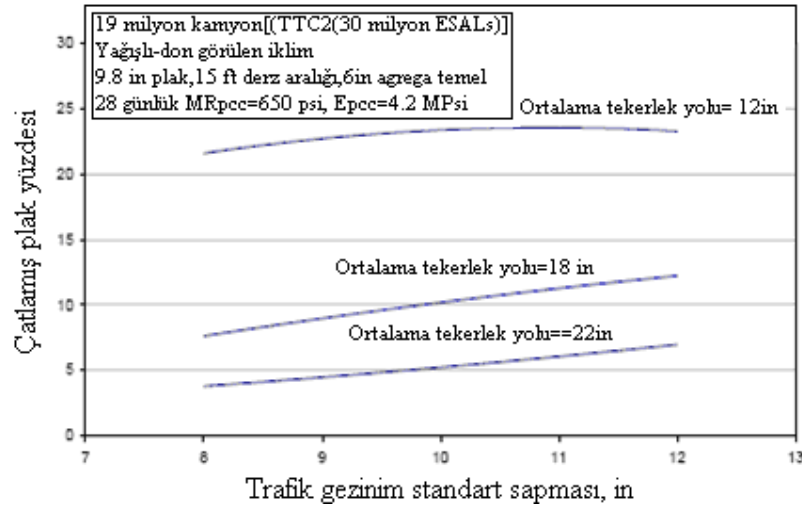
Şekil 8.9: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların ortalama tekerlek yoluna olan duyarlılığı [15]

Şekilde görüldüğü gibi, ortalama tekerlek yeri; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlamları ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisini etkileyen çok hassas bir faktördür. Ortalama tekerlek yerine bağlı olarak,

plak çatlamaları dört faktörden birine veya daha fazlasına bağlı olarak değişim gösterir. Eğer tipik genişlikteki (8,5 ft (2.6 m)) bir kamyon standart genişlikteki (12 ft (3.6 m)) bir şeritte mükemmel bir şekilde ortalanmışsa, tekerleğin izlediği yolun yol işaretine olan ortalama mesafesi 21 in (0.5 m) olacaktır. Saha koşulları ve bağlanmış olan portland çimentosu betonundan banket veya genişletilmiş plak gibi tasarım özellikleri tekerleğin yol işaretlerine olan ortalama mesafesini etkileyebilmektedir. Üç girdi düzeyindeki bu girdinin tahmini, kılavuzda; BÖLÜM 2-Kısım 4'te incelenmiştir. Düzey 3'te, daha doğru bilgiler elde edilemedikçe, bu girdi için 18 inchlik değer kullanılabilir.

- **Trafik Gezinim Standart Sapması**

Bu, yanal trafiğin gezinim standart sapmasıdır. Gezinim, bozulmaların ve performansın önceden tahmin edilebilmesi için bir nokta üzerindeki dingil uygulamaların elde edilmesinde kullanılır. Bu parametre üstyapı bozulmalarının önceden tahminine etki eder, ama Şekil 8.10'da gösterildiği gibi nispeten hassas olmayan bir faktördür.



Şekil 8.10: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamaların trafik gezinim standart sapmasına olan duyarlılığı [15]

Saha koşulları ve bağlanmış portland çimentosu betonu banket veya genişletilmiş plak gibi üstyapı tasarım özellikleri trafik gezinim standart sapmasına etki eder. Üç girdi düzeyindeki bu girdinin saptanması, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 4'te detaylı olarak açıklanmıştır. Daha gerçekçi bilgiler elde edilemedikçe, Düzey 3'teki 10 inchlik değer bu girdi için kullanılabilir.

- **Tasarım Şeridi Genişliği**

Bu, tasarım şeridinin her iki yanındaki yol işaretlemeleri arasındaki mesafedir. Bu girdi plak genişliğine eşit olabilir veya olmayabilir. Standart genişlikteki şeritler için varsayılan değer 12 ft (3.6 m)'tir. Şu da vurgulanmalıdır ki, bu parametre gerçek trafik şeridi genişliğiyle ilgilidir ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların hem kırılma hem de çatlama performansı üzerinde oldukça büyük etkisi olan “plak genişliği” ile ilgili değildir.

- **Her Bir Kamyon Sınıfı için Dingil Tiplerinin Sayısı**

Bu girdi her bir kamyon sınıfı (4. sınıftan 13. sınıfa kadar) ve her bir dingil tipi (single-tandem-tridem-quad) için ortalama dingil sayısını gösterir. Üç girdi düzeyindeki bu girdinin tahmin edilmesi, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 4'te belirtilmiştir. Düzey 3'te kullanım için, uluslararası trafik veri tabanından elde edilmiş olan varsayılmış değerler, kılavuzda BÖLÜM 2, Kısım 4'te ortaya konmuştur.

- **Dingil Konfigürasyonu**

Üstyapı tepki modelinde kullanılmak üzere tekerlek ve dingil yükü detaylarının tanımlanması bir dizi veri elemanlarına ihtiyaç duyulur. Aşağıdaki elemanların her biri için tipik değerler sunulmuştur. Bununla birlikte eğer mümkünse sahaya özgü değerler kullanılabilir.

- Ortalama Dingil Genişliği-bir dingilin dış iki kenarı arasındaki mesafe. Tipik kamyonlar için, dingil genişliğinin 8,5 ft (2.6 m) olduğu farz edilebilir.
- Çifte Lastik Aralığı- bir çifte lastiğin merkezleri arasındaki mesafe. Kamyonlar için tipik çifte lastik aralığı 12 in (30 cm)'dir.
- Tekerlek Basıncı-taşıt lastiği şişirme basıncı veya tekil lastiğin veya çifte lastiğin temas basıncı. Ağır kamyonlar için, kalibrasyonda kullanılan tipik taşıt lastiği şişirme basıncı 120 pci'dir.
- Dingil Aralığı-arka arkaya gelen ikili, üçlü veya dörtlü iki dingil arasındaki mesafe. Tandem (çiftli) dingiller için ortalama dingil ağırlığı 51.6 in (1.31 m) veya üçlü dingiller için ortalama dingil aralığı 49.2 in (1.25 m)'dir.

- **Dingil Açıklığı**

Bu bilgi, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yukarıdan-aşağıya çatlamlar yük uygulamaları sayısının belirlenmesinde kullanılır. Yukarıdan-aşağıya çatlamlarda bir dingil kombinasyonunun sebep olduğu kritik yükleme plağın her iki yanına yakın olacak şekilde aynı anda bir dingil yükü ortaya koyar (Şekil 8.6). Genellikle treyler çekici veya diğer kamyonların dönüş ve sürüş dingilleri bu yük kombinasyonlarının en yaygın kaynaklarıdır. Fakat çoklu treylerlerde aynı zamanda bu tip yüklemeye neden olabilir. Bu kategorideki girdiler şunları kapsamaktadır:

- Ortalama dingil aralığı (ft)- kısa, orta veya uzun. Kısa, orta veya uzun dingil aralıkları için önerilen değerler sırayla 12, 15 ve 18 ft (3.6, 4.5 ve 5.4 m)’dir.
- Kamyon yüzdesi- kısa, orta ve uzun dingil aralıklı kamyon yüzdesi. Daha doğru bilgiler elde edilemedikçe eşit dağıtım kullanılır. (Örneğin; kalibrasyonda kısa, orta ve uzun dingiller için sırayla %33, %33,3 ve %34’lük değerler kullanılmıştır.)

Kamyon yüzdesi, treyler çekicilerinin (8. sınıf ve yukarısı) dingil aralığının dağıtımıdır. Eğer trafik akımında diğer yukarıda tanımlanan kısa, orta, uzun dingil kümesi içindeki dingil aralığına sahip başka araçlar da mevcut ise, bu araçların frekansı treyler çekicilerinin dingil aralığı dağıtımına eklenmelidir. Örneğin; eğer kamyon trafiğinin %10’u “kısa” dizi içindeki treylerden treylere dingil aralığına sahip treylerden (11. sınıf ve üzeri) oluşuyorsa “kısa” dingiller için kamyon yüzdesine %10 eklenmelidir. Bu şekilde kısa, orta ve uzun kategorilerdeki kamyon yüzdeleri toplamı 100’den büyük olabilmektedir.

8.3.4.4 Girdilerin İşlenmesi

Trafik girdileri tüm tasarım periyodu boyunca her bir ay için aşağıdaki “işlenmiş girdilerin” meydana getirilebilmesi için ayrıca işlenir.

- Her bir yük kategorisi altındaki tekil dingil sayısı,
- Her bir yük kategorisi altındaki ikili dingil sayısı,
- Her bir yük kategorisi altındaki üçlü dingil sayısı,
- Her bir yük kategorisi altındaki dörtlü dingil sayısı,

- Her bir yük kategorisi altındaki treyler çekicilerinin (8. sınıf ve üzeri) sayısı. (yukarıdan-aşağıya çatlama).

Yukarıdan-aşağıya çatlama için yük kombinasyonunun bir direksiyon dingili ve bir tandem dingilden meydana geldiği farz edilir. Tandem dingilin diğer tandem dingiller gibi aynı yük dağıtımlarına sahip olduğu farz edilirken direksiyon dingilinin 12000 lb'lik (5.4 ton) sabit bir yüke sahip olduğu farz edilir.

Saatlik trafik dağıtım faktörleri her bir bozulma için hasar hesaplama süresindeki saatlik trafiğin elde edilebilmesi için işlenmiş trafik girdilerine uygulanırlar (tasarım periyodunun her bir ayı için dingil tipi aracılığıyla trafik sayımı). Kılavuzda; Ek JJ, KK, LL ve NN ile birlikte Kısım 8.4 ve Kısım 8.5'te trafik girdilerinin ek prosesine ilişkin daha fazla ayrıntı sunulmuştur.

8.3.5 İklim

Rijit üstyapıların performansı üzerinde çevresel koşulların kayda değer bir etkisi vardır. İklimsel faktörlerin üstyapıda kullanılan malzemelerle ve yüklemelerle etkileşimi karmaşıktır. Yağış, sıcaklık, donma-çözülme döngüleri ve yer altı su seviyesinin derinliği gibi faktörler üstyapıya etki etmektedir ve sıra ile taban zemini sıcaklığı ile nem içeriği üstyapı tabakalarının yük taşıma kapasitesini ve sonuç olarak üstyapı performansını etkiler. Üstyapı tasarımı için gerekli olan çevresel girdiler üzerindeki detaylar, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3'te sunulmuştur. Bu bölüm rijit üstyapı analizi için gerekli olan iklim girdilerinin ve rijit üstyapı üzerinde iklim etkisinin bir özeti sunulmuştur.

8.3.5.1 İklimsel Girdiler

Rijit üstyapı tasarımının yapılması için gerekli olan iklim ile ilişkili bilgiler aşağıdakilerdir:

- Tasarım periyodu boyunca saatlik hava sıcaklığı,
- Tasarım periyodu boyunca saatlik yağış,
- Tasarım periyodu boyunca saatlik rüzgar hızı,
- Tasarım periyodu boyunca saatlik güneş ışığı yüzdesi,
- Çevredeki saatlik bağıl nem değerleri,
- Proje kesimindeki mevsimsel veya sabit yer altı su seviyesi derinliği.

Eğer mümkünse yukarıdaki ilk beş girdi verilen bir kesim için hava istasyonu verilerinden elde edilmelidir. ABD'deki proje kesimleri için bu bilgiler Ulusal İklimsel Veri Merkezi (National Climatic Data Center-NCDC) veri tabanından elde edilebilmektedir. Tasarım kılavuzu yazılımı ABD'deki 800'den fazla şehrin üzerindeki kapsamlı bir iklimsel veri tabanını ve uygulanabilir kesimler arasında interpolasyon kapasitesini içermektedir. Mevsimsel yeraltı su seviyesi derinliği dışında, ABD'deki verilmiş herhangi bir kesimdeki gerekli olan tüm iklimsel bilgiler aşağıdaki girdilerin basitçe önceden hazırlanmasıyla elde edilebilmektedir:

- Üstyapının bulunduğu bölgenin matematiksel konumu-enlem ve boylam,
- Coğrafi yükseklik.

Spesifik üstyapı kesimlerinde tasarım için, tasarımcılar en yakın hava istasyonundan elde edilen verileri veya gayri resmi bir hava istasyonu yaratmak için en yakın altı hava istasyonundan gelen interpolate edilmiş verileri kullanabilirler. Gayri resmi hava istasyonu yaratılması yaklaşımı mutlaka önerilir, çünkü; veriler gerçek proje kesimine göre interpolate edilmiştir ve bu yaklaşım hava istasyonlarından birinden diğerine gözden kaçırılmış verileri daha yeterli bir şekilde telafi etmektedir.

8.3.5.2 İklimsel Girdilerin İşlenmesi

İklimsel girdiler; üstyapı malzeme özellikleri, tabaka kalınlıkları ve drenajla ilişkili girdiler ile birlikte tasarım analizinde kullanılmak üzere dikkate alınacak aşağıdaki bilgilerin elde edilmesi için EICM aracılığıyla birleştirilir.

- Rijit plak boyunca sıcaklık dağılımının saatlik profilleri- EICM, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların analizi için plak kalınlığı boyunca 11 eşit aralıklı noktadaki sıcaklıkları ortaya koymaktadır.
- Diğer üstyapı tabakaları boyunca saatlik sıcaklık ve nem profilleri (don derinliği hesaplamaları dahil)- EICM kullanılarak elde edilir.
- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı için portland çimentosu betonunun 0-gerilme anındaki sıcaklığı.
- Bağlayıcısız temel/alt temel ve taban zemini tabakaları için aylık veya 15 günlük (donma veya son zamanlardaki donma periyotları boyunca) tabaka modüllerinin tahmini.

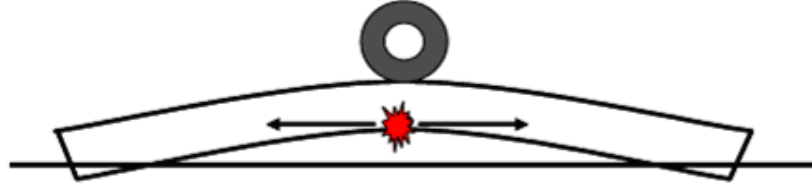
- Yıllık donma indeksi değerleri.
- Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı.
- Çevredeki donma-çözülme döngüsünün sayısı.
- Aylık bağıl nem değerleri.

8.3.5.3 İklimin Rijit Üstyapı Davranışı Üzerindeki Etkisi

Hem sıcaklığın hem de nemin rijit üstyapıların performansı üzerinde kayda değer bir etkisi vardır. Bu yüzden iklimin rijit üstyapıların davranışı üzerindeki etkisine dikkat çeken bir açıklama sunulmuştur. Bağlayıcısız üstyapı tabakaları üzerine iklimsel faktörlerin etkileşimine dair açıklamalar tasarım kılavuzunda BÖLÜM 2, Kısım 3'te sunulmuştur.

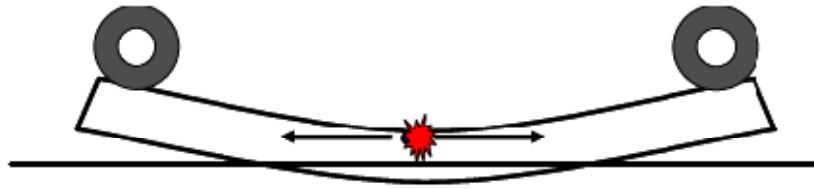
• Güneş Işınımından (Radyasyonundan) Doğan Sıcaklık Farklılıkları

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların veya sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların plaklarının yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farklılıklarının plak yüzeyi ile tabanındaki kritik gerilmeler üzerinde kayda değer bir etkisi vardır. Sıcak ve güneşli olan bir günde, rijit plağın yüzeyi tabanına göre daha sıcaktır (plak boyunca pozitif sıcaklık farklılığı). Şekil 8.11'de gösterildiği gibi sonuç; plak yüzeyinin tabana oranla uzaması ve ortaya çıkan konveks eğrilmedir. Bu durum plağın orta kısmının altında bir boşluğa sahip olunması ile eş değerdir. Plağın kendi ağırlığından dolayı plak eğrilmesine gösterdiği direnç nedeniyle çok aşırı sıcaklık koşulları altında olmamak kaydıyla gerçek boşluklar gelişmeyebilir. Buna karşın serbest plak hareketlerini sınırlayan bazı kuvvetler (plağın kendi ağırlığı dahil) gerilmelere neden olur ve bu takdirde plak eğrilmelerinin sınırlanması plağın altında çekme gerilmelerinin artışı ile sonuçlanır. Trafik yükleri altında, sıcaklık farklılıkları nedeni ile ortaya çıkan herhangi bir gerçek desteklik kaybı plağın altındaki kritik çekme gerilmelerini ayrıca artırır.



Şekil 8.11: Gündüz saatlerindeki pozitif sıcaklık farklılığına ek olarak plak altında yüksek çekme gerilmesi ile sonuçlanan kritik trafik yükleme pozisyonundan kaynaklanan portland çimentosu plağın kıvrılması [15]

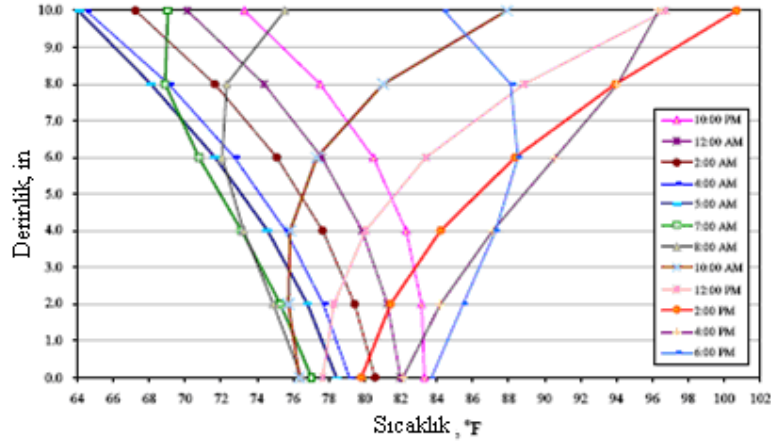
Geceleri rijit plak yüzeyi tabandan tipik olarak daha soğuktur (plak boyunca negatif sıcaklık farklılığı). Bu durum Şekil 8.12’de görüldüğü gibi plağın konkav olarak eğilmesiyle sonuçlanır. Bu hareket plağın kenarlarının altında boşluklara sahip olunması ile eş değerdir. Eğrilme durumu trafik yükü ile birleştiğinde, yukarıdan-aşağıya yorulma çatlaklarının başlamasına yol açabile yüzeydeki çekme gerilmelerini artırır. Rijit üstyapılarda kritik gerilmelerin sıcaklık gradientlerine (değişim ölçülerine) olan aşırı duyarlılığı nedeniyle, sıcaklıktaki saatlik değişimlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tasarım kılavuzu yazılımındaki EICM’nin kullanımıyla bu durumun üstesinden otomatik olarak gelinmiştir. Saatlik tarihi iklimsel verilere göre üstyapı strüktürüne ve malzeme özelliklerine dayalı olarak, EICM tasarım periyodunun her yılı için rijit plakta saatlik sıcaklık profillerini içeren bir dosyayı ortaya koyar (365x24=8760 profil/yıl).



Şekil 8.12: Gece saatlerindeki negatif sıcaklık farklılığına ek olarak plak üstünde yüksek çekme gerilmesi ile sonuçlanan kritik trafik yükleme pozisyonundan kaynaklanan portland çimentosu plağın kıvrılması [15]

Şekil 8.13’te 24 saatlik bir periyot içinde plaktaki 10 inch (25 cm) boyunca lineer olmayan sıcaklık profillerine ait bir örnek gösterilmektedir. Elde edilebilir iklim verileri tasarım periyodunun doldurulması amacıyla yeniden işlemden geçirilir.

Örneğin; eğer tasarım periyodu 20 yıl ise fakat sadece 5 yıllık iklim verileri elde edilebilir durumda ise, EICM elde edilebilir 5 yıl için sıcaklık profillerini saptar ve daha sonra tasarım periyodunu tamamlamak için sonuçları dört defa kullanır.



Şekil 8.13: Tipik bir bahar günü için portland çimentosu plağın 10 in (25.4 cm) derinliği boyunca gözlemlenen sıcaklık profili örneği [15]

Lineer olmayan her bir saatlik sıcaklık profili tasarım kılavuzu yazılımında ölçüm etkinliği için bir efektif sıcaklık eğrisine otomatik olarak dönüştürülür. Yalnızca lineer elemanların kullanımı (plağın yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkı) portland çimentosu betonu gerilmelerinin tahmininde kayda değer yanlılıklarla sonuçlanabilmektedir. Bu tarihsel efektif saatlik sıcaklık farklılıkları, analizde kullanılmak için aylık gündüz (pozitif) ve gece (negatif) sıcaklık farklılığı olasılık dağıtımının ortaya konmasında kullanılır.

- **Nem Eğrilmesi**

Sertleşmiş beton, nemdeki artışla genişler ve nem kaybı ile büzülür. Portland çimentosu betonu kaplamanın yüzeyi kupkuru olabilir fakat çok kurak bölgelerde bile, yaklaşık olarak yüzeyden 2 in (5 cm) aşağıdaki seviyede nem düzeyi nispeten daha yüksek bir düzeyde (bağıl nem %85 veya daha yüksek) sabit olarak kalır. Bu durum, Şekil 8.12'de görüldüğü gibi, plağın yukarıya doğru kıvrılmasıyla sonuçlanır. Plağın üst kısmında meydana gelen kuruma büzülmesi miktarı, kür tipini ve portland çimentosu betonunun bileşenlerini içine alan birçok faktöre göre değişim göstermektedir.

Portland çimentosu betonundaki kuruma büzülmesinin bir kısmı geri dönmez fakat çevredeki bağıl neme göre değişen geri dönen bir kısım da vardır. Geri dönen

kuruma büzülmesi nem eğrilmelerinde mevsimsel değişmelere (mevsimsel nem eğrilmeleri) sebep olurken, geriye dönmeyen b z lmeler kalıcı nem eğrilmelerine neden olur.

- **Kalıcı Kıvrılma ve Eğrilmeler**

Yeni kaplanmış rijit  st yapıların, şiddetli güneş ışınımından artı hidrasyon ısısından kaynaklanan, yüksek-pozitif sıcaklık farklılıklarına neden olan bir koşulun ortaya çıktığı sıcak günlerde, rijit  st yapıların kaplanma işlemi genellikle sabah yapılır. Rijit plaklar sertleştiklerinde d zd rl r fakat sertleşme süresince maruz kalınan koşullara göre değişen kayda değer bir miktardaki pozitif sıcaklık gradiyenti (plak yüzeyinin tabanına göre daha sıcak olması durumu) ortaya çıkabilmektedir. Bu sıcaklık “0-gerilme sıcaklığı gradiyenti” (Zero-stress gradient) olarak adlandırılır. Plaklardaki sıcaklık gradiyenti her ne zaman 0-gerilme sıcaklığı gradiyentinin altına düşerse, plaklar yukarıya doğru kıvrılarak derzli donatısız tipteki rijit  st yapıların veya sürekli donatılı tipteki rijit  st yapıların yukarıdan-aşağıya çatlamasına yol açabilen plak yüzeyindeki çekme gerilmelerine neden olur. Bu yüzden plaklarda etkili negatif bir sıcaklık gradiyenti yaratılır.  st yapı plaklarının yukarıya doğru kıvrılması; plağın kendi ağırlığını, kayma donatılarını ve plağa bağlanmış herhangi bir temel tabakasının ağırlığını içeren birkaç faktör aracılığıyla sınırlanır. Bu hipotez, farklı iklim koşullarında yer alan saha plakları aracılığıyla elde edilen veriler kullanılarak desteklenmektedir. Bu faktörler, meydana gelebilecek s nme relaksasyonunun (gevşeme) miktarı ile birlikte gerçek kalıcı kıvrılma miktarını etkilemektedir.

Portland  imentosu betonu ile kaplama işlemi öğleden sonra veya geceleri yürütülürse, plağa verilen kalıcı sıcaklık gradiyenti çok daha düşük olacaktır ve hatta potansiyel olarak negatif olacaktır. Su spreyi, nemli çuval bezi ile rutubetli ortamda k r ve reflektif k r bileşikleriyle yapılan k r uygulamaları her zamanki k r bileşiklerinden daha düşük bir “0-gerilme” sıcaklığını veya inşa sırasında oluşan kalıcı sıcaklık gradiyenti verilmesini sağlar.

“Nem Eğrilmesi” başlığı altında incelendiği gibi, diferansiyel büzülme, aynı zamanda “0-gerilme” sıcaklık gradiyenti ile üst üste konulan ve kalıcı kıvrılmalardan kolaylıkla ayırt edilmesi olanaksız olan kalıcı eğrilmelerin de ortaya çıkmasına neden olur. Bu yüzden, kıvrılma ve eğrilmenin kalıcı bileşenler göz önünde birlikte bulundurulur. Kalıcı kıvrılmanın ve eğrilmenin magnitüdü derzli donatısız tipteki

rijit üstyapı çatlamlarının kalibrasyonundan tahmin edilir ve plağın yüzeyi ile tabanı arasındaki efektif sıcaklık farklılığı açısından ifade edilerek “kalıcı kıvrılma/eğrilme” olarak adlandırılır. Bu gözden kaçırılmamalıdır ki; kalıcı kıvrılma/eğrilmenin yalnızca bir kısmı gerçek anlamda üstyapı tepkisine etki eder, çünkü portland çimentosu betonunda zamanla oluşan sünme portland çimentosu betonu plaklardaki mevcut olan kalıcı eğrilme etkilerini etkisiz duruma getirir. Kalıcı kıvrılma/eğrilmenin magnitudü uzun dönemli sünme etkilerini yansıtan kalibrasyondan tahmin edilir.

8.3.5.4 Rijit Üstyapı Tasarımında İklim Etkilerinin Göz Önünde Bulundurulması

Sıcaklık ve nem etkileri, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımında aşağıda olduğu gibi direkt olarak göz önünde bulundurulur[15]:

- Diferansiyel kalıcı büzülmeden dolayı, inşa süresince (0-gerilme sıcaklığı gradiyenti) oluşan kalıcı kıvrılmalar; kalıcı eğrilmeler ile birleştirilir ve plak yüzeyi ile tabanı arasındaki efektif sıcaklık farkına göre açıklanır (“kalıcı kıvrılma/eğrilme” olarak adlandırılır). Bu parametre derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımında direkt ve etkili bir noktadır ve tipik inşa ile karışım durumu için ulusal kalibrasyon aracılığıyla saptanmaktadır.
- Güneş ışınımından kaynaklanan, geçici-saatlik negatif ve pozitif non-lineer sıcaklık farklılıkları (plağın yüzeyi ile tabanı arasında) EICM’nin kullanımıyla hesaplanır.
- Yılın her ayı süresince bağıl nemdeki değişimlerden kaynaklanan plak yüzeyindeki geçici negatif nem büzülmesi her ay için bir eş değer sıcaklık farklılığına çevrilir.

Aylık artımlarla hasar tespiti için de kullanılan kritik plak gerilmelerinin hesaplanması için rijit plağın bir yanından diğer yanına sıcaklık ve nem farklılıkları tahmin edilir ve dingil yükleriyle birleştirilir.

Hem sıcaklık hem de nem değişimleri, derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda derz açılıp kapanmalarında direkt olarak göz önünde

bulundurulmaktadır. 0-gerilme sıcaklığı, portland çimentosu betonu sıcaklığının bu değerin altına düştüğünde, derz ve çatlaklarda açılmalara sebep olan betonun yeteri kadar sertleştiği sıcaklık olarak dikkate alınmıştır. Bu yüzden daha yüksek sıcaklıklarda yerleştirilen ve sertleşen bir plakta, daha düşük sıcaklıkta yerleştirilen ve sertleşen bir plağa göre daha geniş derz ve çatlakların sıkıntısı çekilecektir. Daha geniş derz ve çatlaklar, yük transfer etkinliklerini kaybederek artan derz bozulmalarına ve çatlak detorasyonlarına yol açarlar.

8.3.6 Drenaj ve Yüzey Özellikleri

Bu kategori altında gerek duyulan bilgiler şunları içermektedir:

- Üstyapı yüzey tabakasının (portland çimentosu betonunun) kısa dalga emme kapasitesi,
- Sızdırma potansiyeli,
- Üstyapı enine eğimi,
- Drenaj yolunun uzunluğu.

Yukarıdaki listede yer alan ilk madde, aslında üstyapı tabakalarında sıcaklık rejimi tanımlamasındaki iklimsel verilerle birbirini etkileyen bir portland çimentosu betonu malzemesi özelliğidir. Geriye kalan üç madde sızdırma ve drenaj ile ilişkilidir. Burada, detaylı drenaj tasarımlarına ve inşa metodlarına ilişkin herhangi bir rehberlik sunulmamıştır. Drenaj elemanlarının tasarımı ve geniş kapsamlı üstyapı drenajının nasıl yapısal tasarıma dahil edildiği, kılavuzda; BÖLÜM 3, Kısım 1’de ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bu kısımda üzerinde durulan girdilerin; belli bir yağış miktarı sonunda üstyapı strüktürüne dahil olan nem miktarı üzerinde kayda değer bir etkisi vardır ve bu girdiler drenaj hesaplamaları için gereken diğer parametrelerin bazılarının tanımlanmasına yardımcı olur.

8.3.6.1 Üstyapı Yüzey Tabakasının (Portland Çimentosu Betonunun) Kısa Dalga Emme Kapasitesi

Üstyapı yüzeyinin kısa dalga emme kapasitesi; üstyapının kompozisyonuna, rengine ve dokusuna göre değişim gösterir. Kısa dalga emme kapasitesi, üstyapı strüktürü içindeki sıcaklık rejimine ve buna bağlı üstyapı tepkilerine doğal olarak etki eder. Üstyapı yüzeyinin maruz kaldığı toplam enerjinin üstyapı yüzeyi aracılığıyla emilen

güneş enerjisi miktarının yüzdesidir. Bu girdi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Genellikle daha açık ve reflektif yüzey, daha düşük kısa dalga emme kapasitesine sahiptir. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de kısa dalga emme kapasitesi ile ilgili daha detaylı bilgiler sunulmuştur. Portland çimentosu betonu için tipik değerler 0,7 ile 0,9 arasındadır. Rijit üstyapı performansı modellerinin kalibrasyonunda kullanılan önerilmiş hazır değer 0,85’tir. Kılavuzda BÖLÜM 3, Kısım 3’te bu girdi ve üstyapı sistemi dahilindeki sıcaklık ve nem rejimi tanımlaması üzerindeki rolü incelenmiştir.

8.3.6.2 Sızdırma

Bu veri üstyapı strüktürüne sızan suyun miktarını nicelendirir. Bu verinin miktarını belirtmek için üç seçenek mevcuttur-çok küçük, orta ve aşırı büyük. Sızdırma miktarı; yağış miktarının, üstyapı koşullarının ve banket tipinin bir fonksiyonudur. Bununla birlikte kolaylık sağlanması amacıyla, bu verinin seçilmesindeki ana noktalar; şerit-banket derzinin üstyapı strüktürüne dahil olan nemin en büyük kaynağı olmasından dolayı, banket tipine dayanmaktadır:

- Çok Küçük- Bu değer, bağlı rijit banketler kullanıldığında veya şerit-banket derzinin sızdırmazlığının korunması için agresif bir politika sürdürüldüğünde geçerlidir. Bu değer aynı zamanda banket altında, kenar drenlerinin olması durumunda da kullanılabilir.
- Orta- Bu değer diğer tüm banket türleri için geçerlidir.
- Aşırı Büyük- Genellikle yeni veya yeniden inşa edilen rijit üstyapı tasarımında kullanılmaz.

Bu parametre ile ilişkili daha fazla ayrıntı kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3’te sunulmuştur.

8.3.6.3 Drenaj Yolu Uzunluğu

Bu, üstyapı enkesitinin en yüksek noktası ile drenajın meydana geldiği nokta arasındaki yatay mesafedir. Boyuna kenar dreninin şişkinleştirilmiş üstyapı sistemleri için bu, şişkinleştirilmiş enkesitin tepesi ile kenar dren borusu merkezi arasındaki mesafe olacaktır. Bu girdi ile ilişkili daha fazla ayrıntı kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3’te sunulmuştur.

8.3.6.4 Üstyapı Enine Eğimi

Enine eğim trafik yönüne dik doğrultudaki üstyapı yüzeyinin eğimidir. Bu girdi ıslak koşuldaki bir üstyapı temel veya alt temel tabakasının dren edilmesi için gereken sürenin hesaplanmasında kullanılır.

8.3.7 Üstyapı Strüktürü

Rijit üstyapı tasarım prosedürü Şekil 8.3'te gösterildiği gibi; çok çeşitli portland çimentosu betonu, temel (rijit plağın hemen altındaki tabaka) ile alt temel malzemesi özelliklerini ve tabaka kalınlıklarını ortaya koymaktadır. Örneğin, bir rijit üstyapı strüktürü; portland çimentosu betonu plağından bitüm ile iyileştirilmiş bir temelden, agrega alt temelden, sıkıştırılmış taban zemininden, doğal zeminden ve ana kayadan meydana gelebilir. Tasarım kılavuzu yazılımı maksimum 20 tabakanın analizi için kullanılabilir. Bununla birlikte üstyapı strüktürü ve taban zemininden (veya kaya tabanından) oluşan belirli tabakaların otomatik alt-tabakalandırılması nedeniyle maksimum 10 gerçek tabaka bir rijit üstyapı strüktürü için tanımlanabilir. Tanımlamada şu kuralların veya sınırlamaların karşılanması gerekir:

- Rijit üstyapı tasarımındaki yüzey tabakası her zaman bir portland çimentosu betonundan oluşan bir tabakadır.
- Zemin üzerindeki plak (iki tabaka) analiz edilebilecek en küçük strüktürdür.
- Stabilize edilmiş iki tabaka arasına yalnızca bir bağlayıcısız bir granüler tabaka yerleştirilebilir.
- Üstyapı strüktüründeki son iki tabakanın bağlayıcısız tabakalar olması gerekir. Tasarım kılavuzu yazılımı, bu sınırlamaların karşılanması için zemin üzerine plak şeklindeki üstyapılarda ve bağlayıcılı bir tabakanın direkt olarak taban zemini üzerine yastı olduğu üstyapılarda alt tabakalar otomatik olarak iki özdeş tabakadan meydana gelen taban zemini olarak alınır.

Bir deneme tasarımının tanımlanması tüm üstyapı tabakalarının ve taban zemininin de dahil olduğu her bir ayrı tabaka için malzeme özelliklerinin tanımlanmasını gerektirir. Seçilen deneme tasarımına göre analiz prosedürünün tabakalandırma gerekliliklerini karşılamak için alt-tabakalandırma gerekli olabilmektedir. Tasarım kılavuzu yazılımı; malzeme tipine, tabaka kalınlığına ve üstyapı strüktürünün dahilindeki tabakaların bulunduğu yere dayalı olarak alt-tabakalandırma işlemini

dahili olarak yürütür. Her bir malzeme tipi ile birlikte gerekli olan malzeme girdilerinin bir özeti için, izleyen paragraflarda alt-tabakalandırma planı üzerinde durulmuştur. Malzeme özellikleri üzerindeki önemli noktalar, kılavuzda daha detaylı olarak BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur.

8.3.7.1 Portland Çimentosu Betonu Tabakası

Tasarım ve analiz amaçları için portland çimentosu betonu tabakası alt-tabakalandırma işlemine tabi tutulmaz. Portland çimentosu betonu tabakası için gerekli olan özellikler üç kategoriye bölünmüştür- genel ve termal özellikler, portland çimentosu betonu karışım özellikleri ve dayanım ile rijitlik özellikleri. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

Bu girdiler hakkında daha detaylı bilgi kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur.

- **Genel ve Termal Özellikler**

- Tabaka kalınlığı. Yeni üstyapı tasarımı için tasarım kalınlığı yaklaşık olarak 6 inch (15 cm) ile 17 inch (43 cm) arasında değişmektedir.
- Poisson oranı, μ -portland çimentosu betonu için tipik değerler 0,15’ten 0,25’e kadar değişmektedir.
- Termal genleşme katsayısı, α_{pcc} - portland çimentosu betonunun termal genleşme katsayısı, agrega tipine ve karışımdaki çimento miktarına bağlı olarak $4 \times 10^{-6} / ^\circ F$ ile $7 \times 10^{-6} / ^\circ F$ arasında değişir. Bu parametre oldukça önemli olduğundan dolayı, bu değer projesi karışımının direkt testi (Düzey 1) sırasında saptanması önerilir. (Detaylar için kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’ye bakınız).
- Isı iletkenliği- sıcaklık gradiyenti normalinin yüzeye birim zamanda birim yüzey alanına normal olarak yayılan ısı miktarı. Kalibrasyonda kullanılan önerilmiş değer 1,25 BTU/hr-ft- $^\circ F$ ’dir.
- Isı kapasitesi- birim malzeme kütlelerinin sıcaklığını bir birim artırmak için gereken ısı miktarı. Kalibrasyonda kullanılan önerilmiş değer 0,28 BTU/lb- $^\circ F$.

- **Portland Çimentosu Betonu Karışımı İle İlgili Özellikler**

Tasarım prosedürü; rötre, portland çimentosu betonu 0-gerilme sıcaklığını ve yük transfer detorasyonunu içeren malzeme davranışının modellenmesi için portland çimentosu betonu karışımı ile ilişkili şu özellikleri gerektirir:

- Çimento tipi (tip I, II, III),
- Çimento içeriği,
- Su/çimento (w/c) oranı,
- Agregatı tipi,
- Portland çimentosu betonu 0-gerilme sıcaklığı, T_Z - portland çimentosu betonu tabakasının 0 termal gerilme gösterdiğiindeki sıcaklık (yerleştirmeden sonra ve kür süresi boyunca) olarak tanımlanır. Eğer portland çimentosu betonu sıcaklığı $T_Z < s$ ise plakta çekme gerilmeleri meydana gelir. Aslında T_Z tekil bir sıcaklık olmayıp plak derinliği boyunca değişim (0-gerilme gradiyenti olarak adlandırılır) gösterir. Bununla birlikte derz ve çatlak açılmalarının kararları için T_Z 'den söz edildiğinde, bu basitçe 0-gerilme sıcaklığı olarak adlandırılacaktır ve aşağı yukarı ortalama plak sıcaklığı olarak dikkate alınmalıdır. T_Z verisi direkt olarak girilebilir veya aylık çevresel sıcaklıktan ve çimento içeriğinden, kür bileşenli gündüz inşasına dayanan aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir.

$$T_Z = (CC \times 0,59328 \times H \times 0,5 \times 1000 \times 1,8 / (1,1 \times 2400) + MMT) \quad (8.1)$$

T_Z : Portland çimentosu betonu tabakasının 0-termal gerilme sergilediğiindeki sıcaklık (izin verilebilir aralık: 60-120 °F)

CC: Çimento içeriği, lb/yd³

H: $-0,0787 + 0,007 \times MMT - 0,00003 \times MMT^2$

MMT: inşa ayı için ortalama aylık sıcaklık, °F

Tablo 8.1 farklı ortalama aylık sıcaklıkları ve portland çimentosu betonu karışım dizaynındaki farklı çimento içerikleri için 0-gerilme sıcaklıklarını göstermektedir. T_Z eşitliğinin birçok sınırlamaya sahip olduğu unutulmamalıdır. Mineral katkıları (uçucu kül, cüruf), çimento kompozisyonunu ve inceliğini, kimyasal katkıları ve diğerlerini içeren hidratasyon ısısına ilişkin birçok faktörün etkisi dikkate alınmaz. Bu eşitlik

derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki üstyapıların tüm kalibrasyonlarında kullanılmıştır ve makul sonuçları sunduğu gözükmektedir.

- %40'lık bağıl nemdeki nihai büzülme- herhangi bir düzeydeki nihai büzülme, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de sunulan prosedürlerin kullanımı ile tahmin edilebilir.
- Geriye dönen büzülme- yeniden ıslanma üzerine geri dönebilir olan nihai koruma büzülmesinin yüzdesi. Daha doğru bilgiler elde edilemedikçe 0,5 değeri kullanılır.
- Kür metodu- kür bileşenleri veya ıslak kür (nihai büzülmeyi etkiler).

Tablo 8.1: Portland çimnetosu betonunun çimneto içeriği ve inşa sırasında çevredeki aylık ortalama sıcaklığa bağlı olan Sıfır-Gerilme Sıcaklıkları [15]

Ortalama Aylık Sıcaklık	H	Çimento İçeriği lbs/cy			
		400	500	600	700
40	0.1533	52*	56	59	62
50	0.1963	66	70	74	78
60	0.2333	79	84	88	93
70	0.2643	91	97	102	107
80	0.2893	103	109	115	121
90	0.3083	115	121	127	134
100	0.3213	126	132	139	145

*F cinsinden portland çimentosu betonunun ortalama sıcaklığı

• Dayanım ve Rijitlik Özellikleri

Portland çimentosu betonunun uzun dönemli dayanım kazancı ve buna karşılık olan portland çimentosu betonunun rijitliğindeki eşitlik bu tasarım kılavuzunda dikkate alınmıştır. Portland çimentosu betonunun dayanım ve rijitlik girdileri şunlardan meydana gelmektedir:

- Kopma modülü (eğilme dayanımı, M_R),
- Statik elastisite modülü, E_{pc}
- Basınç dayanımı, $(f_c)^1$
- Bölünmüş çekme gerilmesi (dolaylı çekme dayanımı testi ile ölçülür), f_t

Girdi düzeyine göre, farklı miktarlardaki bilgiler gerekmektedir:

- Düzey 1- M_R , $(f_c)^1$, f_t ve uygun test prosedürleri kullanılarak saptanan 7, 14, 28 ve 90 günlük E_c 'nin laboratuar test değerleri. Aynı zamanda 20.yıl

sonundaki dayanımın 28 günlük dayanıma oranı da gerekmektedir. En uygun regresyon çizgisi, çeşitli yıllarda artımlı hasar hesaplamalarındaki dayanım ve rijitliğin interpolasyonu veya extrapolasyonu ile elde edilen bu veri noktalarına göre uydurulur (Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'deki ayrıntılar sunulmuştur).

- Düzey 2- laboratuvarca saptanan; 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı $((f_c)^1$ ve 20 yılın sonundaki dayanımın 28 günlük dayanıma oranının değerleri. Her bir hasar artımındaki dayanım, bu girdi noktalarına göre uydurulan en uygun regresyon çizgisinin kullanımıyla elde edilir ve geriye kalan dayanım parametreleri (M_R , f_t ve E_c) iyi şekilde kurulmuş dayanım-rijitlik korelasyonlarının kullanımı ile tahmin edilir (detaylar, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de sunulmuştur).
- Düzey 3- Geçmişteki verilere veya diğer bilgilere dayanarak tahmin edilen 28 günlük basınç dayanımı kopma modülü. Zaman içindeki portland çimentosu betonu dayanımı varsayılan dayanım modelinin veya uygun korelasyonların kullanımı ile elde edilen tasarlanmış dayanıma bağlı olarak hesaplanmış diğer girdilerin kullanımıyla tahmin edilir (detaylar, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de sunulmuştur). Aynı zamanda arzu edilirse, portland çimentosu betonunun elastisite modülleri de Düzey 3'te girilebilir.

Portland çimentosu betonu dayanımı ve modüllerinin özellikleri için işlenmiş girdi, tüm tasarım periyodu boyunca gözlemlenen aylık dayanım ve modül değerleridir.

8.3.7.2 Bitüm ile Stabilize Edilmiş Temel

Tasarım kılavuzu yazılımındaki rijit tasarım ve analiz amaçları için bitüm ile stabilize edilmiş temel tabakası içinde alt-tabakalandırma yapılmaz. Bu tabaka için gerekli olan malzemelerin girdileri iki genel kategori altında gruplandırılmıştır- genel malzemelerin girdileri ve E^* ana eğrisinin çizilmesi için gerekli olan girdiler. Bunların üzerinde aşağıda durulmuştur. Bu veriler üzerinde daha detaylı bilgiler kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de sunulmuştur.

- **Genel Tabaka Özelliği Girdileri**

- Tabaka kalınlığı,
- Poisson oranı,

- Termal iletkenlik- yüzeydeki ortalama sıcaklık gradiyentinin, birim zamanda birim yüzey alanına yayılan ortalama ısı miktarı. Bitüm ile stabilize edilmiş temel malzemesi için tipik değer 0,67 BTU/hr-ft- °F
- Isı kapasitesi- malzemenin birim kütesinin sıcaklığını, bir birim artırmak için gerekli olan ısı miktarı. Bitüm ile stabilize teme için bir tipik değer 0,23 BTU/lb- °F'dir.
- Toplam birim ağırlık- yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfalt için tipik değer 134 lb/ft³ (2146.5 kg/m³) ile 148 lb/ft³ (2370.7kg/m³) arasındadır.

• **E* Ana Eğrisinin Çizilmesi İçin Gerekli Girdiler**

Bitüm ile stabilize edilmiş tabakaların öncelikli malzeme özelliği, bunun dinamik modülüdür (E*). Düzey 1 girdisi için, dinamik modül (E*), çeşitli fonksiyonlardaki ve değerlerdeki yüklemeler için standart test protokollerinin kullanımıyla laboratuvarlarda saptanır. Daha sonra, bu tabakanın yükleme altında ve çeşitli iklimsel koşullardaki davranışını tanımlayan veriden indirgenmiş zamana karşılık olan bir E* ana eğrisi elde edilir. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de dinamik modülün tahmin edilmesi için sunulan eşitlik, şu bilgilerden ana eğrinin oluşturulması için kullanılır:

- Asfalt karışımı özellikleri,
- ¾ in'lik elek üzerinde kalan yüzde- tipik değerler; yoğun gradasyonlu olanlar için %5 ile %16 arasındadır ve geçirimli olanlar için %30'dur.
- 3/8 in'lik elek üzerinde kalan yüzde- tipik değerler; yoğun gradasyonlu olanlar için %27 ile %49 arasındadır ve geçirimli olanlar için %70'dir.
- #4 elek üzerinde kalan yüzde- tipik değerler; yoğun gradasyonlu olanlar için %38 ile %61 arasındadır ve geçirimli olanlar için %95'dir.
- #200 elek üzerinde kalan yüzde- tipik değerler; yoğun gradasyonlu olanlar için %3 ile %8 arasındadır ve geçirimli olanlar için %1'dir.
- Asfalt binder- rijit tasarım için genellikle Düzey 1 girdisine ihtiyaç duyulmaz.
 - Düzey 2 girdisi için- PG gradasyonunu veya viskozite derecesini tanımlar.
 - Düzey 3 girdisi için- PG gradasyonunu, viskozite derecesini veya penetrasyon derecesini tanımlar.

- Genel bitüm özellikleri,
 - Hacimce efektif binder (bağlayıcı) içeriği (yüzde olarak),
 - Hava boşlukları (yüzde olarak),
 - Ana eğri gelişimi için referans sıcaklık (genellikle 70 °F).

Tahmin eşitliği kullanılarak dinamik modülün saptanması üzerinde, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de daha ayrıntılı durulmuştur.

8.3.7.3 Kimyasal Yolla Stabilize Edilmiş Tabakalar

Çimento ile stabilize edilmiş temel tabakaları için alt-tabakalandırma yapılmaz. Çimento ile stabilize edilmiş bir tabakanın tanımlanması için şu girdilere gerek duyulur:

- Tabakanın ortalama elastisite modülü- bu değerin tasarım boyunca sabit kalacağı farz edilir. Bu girde için tipik değerler, malzeme tipine ve stabilize edici içeriğine göre oldukça değişkendir. Başlıca iki tipteki kimyasal olarak stabilize edilmiş temeller için tüm LTPP alanlarından elde edilen ortalama geri-hesap değerleri şöyledir:
 - Çimento ile stabilize edilmiş agrega- ortalama modül değeri 300000 pci olup dağılım 494000 pci’den 2195000 pci’ye kadardır.
 - Zayıf (düşük dozlu) beton- ortalama modül değeri 2099000 pci olup dağılım 275000 pci’den 3046000 pci’ye kadardır.
- Malzemenin birim ağırlığı,
- Poisson oranı,
- Termal iletkenlik- kimyasal yolla stabilize edilmiş bir değer için tipik değer 1,0 BTU/lb- °F’dir.
- Isı kapasitesi- kimyasal yolla stabilize edilmiş bir değer için tipik değer 0,28 BTU/lb- °F’dir.

8.3.7.4 Bağlayıcısız Temel/Alt Temel/Taban Zemini

Bağlayıcısız temel/alt temel ve taban zemini tabakaları için gereken başlıca girdiler şunlardır:

- Tabaka kalınlığı (sadece temel ve alt temel tabakaları için)- taban zemini tabakaları için, kireçle iyileştirilmiş ve sıkıştırılmış olan taban zeminlerini doğal zeminlerden ayrı olarak dikkate almak gerekiyorsa, bunlar yapısal bir tabaka olarak tanımlanabilirler.
- Tabakanın esneklik modülü,
- Poisson oranı,
- Yanal toprak basıncı katsayısı, K_0 - bağlayıcısız sıkıştırılmış malzemeler için tipik bir değer 0,5'tir.

Bağlayıcısız tabakalar ve taban zemini için tabaka modülü iki düzeyde tahmin edilebilir- Düzey 2 ve Düzey 3. Rijit üstyapı analizi için Düzey 1 girdileri elde edilebilir değildir. Düzey 2; CBR veya R- değeri gibi bazı testlerin kullanılarak bir zemin örneğinin test edilmesini ve daha sonra bir tahmin eşitliğini kullanarak tabaka esneklik modülünün tahmin edilmesini gerektirir. Düzey 3 ise; AASHTO veya UCS gibi zemin sınıflandırmalarıyla elde edilen bir korelasyonun kullanımıyla tahmin edilmesini gerektirir. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2'de Düzey 3'teki esneklik modülünün seçimine ayrılan detaylar sunulmuştur. Ne zaman bir granüler bir taban zemini var olursa, önerilen esneklik modülünün oldukça yüksek olacağı ve bu taban zemininin derinliği gerçekten sınırsız değilse bunun abartılı taban zemini destekliğiyle ve çok yüksek bir geri hesaplanmış K- değerleriyle sonuçlanacağı gözden kaçırılmamalıdır ("efektif K-değerinin hesaplanması" bölümüne bak). Daha rijit granüler tabaka nispeten daha ince (örneğin, 5-10 ft'den daha az) ise, bu durumda seçilen taban zemini esneklik modülünde bir azaltma garanti edilmiştir.

Aynı zamanda tasarımcı, bağlayıcısız temel malzemeleri ve zeminler için mevsimsel analizi içeren veya içermeyen seçeneklere de sahiptir. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2 ve 3'te bu girdiler hakkında daha detaylı bilgiler mevcuttur.

8.3.7.5 Mevsimsel Analiz

İklim analizi için gereken malzeme girdilerinin daha kapsamlı açıklamaları için kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 3'e başvurulmalıdır.

Düzey 2 için kullanılabilir seçenekler şunlardır:

- 1- Tipik bir tasarım esneklik modülü (optimum nem içeriğindeki) veya diğer emniyetli dayanım (rijitlik parametreleri, CBR, R- değeri, AASHTO yapısal

tabaka katsayısı veya PI veya gradasyon) girilir ve üstyapı strüktürü boyunca sıcaklık profillerinin ve nem değişimlerine dayanan iklimsel değişimlerin tahmin edilmesi için tasarım kılavuzu yazılımına bağlı EICM modülü kullanılır. EICM için eklenen girdiler, dikkate alınan tabaka için plastisite indeksini, 4 nolu ve 200 nolu eleklerden geçen yüzde ile ağırlıkça %60'ının (D_{60}) geçtiğine karşılık gelen efektif tane boyutunu içerir. EICM, bu girdileri kullanarak; birim ağırlığı, katıların özgül ağırlığını, üstyapı tabakasının suya doygun hidrolik iletkenliğini (permeabilitesini), özgül ağırlıkla ilgili olan optimum nem içeriğini, tabaka doygunluğunun derecesini ve yer altı suyu karakteristiği eğrisi parametrelerini tahmini olarak hesaplamaktadır. Hesaplanmış olan bu nicelikler direkt girdilerle değiştirilebilir.

- 2- EICM'nin kullanılması yerine; iklimsel modül, CBR, R- değeri veya diğer değerler direkt olarak girilebilir. Direkt girdi için, laboratuarda 12 kez tekrarlanan test uygulamalarından tahmin edilen üstyapı esneklik modülü (veya diğer emniyetli zemin testleri) gerekmektedir.
- 3- Düzey 2 girdisinde son olarak, bağlayıcısız malzemelerin modüllerindeki mevsimsel değişimler görmezden gelinebilir. Bu takdirde tipik bir tasarım modülü değeri (veya diğer test değeri) gerekmektedir.

Düzey 3 için, gerekli girdi optimum su içeriğindeki taban esneklik modülüdür ve EICM iklimsel ayarlamaları yapacaktır. Eğer iklimsel analiz arzu edilmezse, tasarımcının tüm yıl boyunca sabit kalacağını umduğu tek bir esneklik modülü girilir (herhangi bir nem içeriği girilmez).

8.3.7.6 Bağlayıcısız Tabakaların ve Taban Zemininin Alt-Tabakalandırılması

Kullanıcı tarafından tanımlanan üstyapı strüktürü genellikle 4-6 tabakaya sahiptir. Bununla birlikte; tasarım kılavuzu yazılımı, sıcaklık ve nem değişimlerinin modellenmesi için, üstyapı strüktürünü 12-15 tabakaya dahili olarak tekrar bölebilir. Yalnızca 6 in (15 cm)'den kalın olan bağlayıcısız temel tabakaları ve 8 in (20 cm)'den kalın olan bağlayıcısız alt-temel tabakaları tekrar tabakalanırlar.

Temel tabakası (ilk bağlayıcısız tabaka) için, ilk alt-tabaka kalınlığı her zaman 2 in (5cm)'dir. Alt-tabakalara bölünmüş olan temel tabakasının ve herhangi bir alt-temel tabakasının geriye kalan kalınlığı minimum 4 in (10cm)'lik kalınlıktaki alt-tabakalara bölünür. Sıkıştırılmış ve doğal zeminler için, minimum alt-tabaka kalınlığı 12 in (30

cm)’dir. Bir üstyapı strüktürü yalnızca yüzeyden 8 ft (2.4 m) derinlikte alt-tabakalara bölünür. Geriye kalan herhangi bir taban zemini sonsuz bir tabaka olarak ele alınır. Eğer kaya tabanı mevcut ise, geriye kalan taban zemini 8 ft (2.4 m) ötedeki bir tabaka olarak ele alınır. Kaya tabanı alt-tabakalara bölünmez ve her zaman sonsuz bir tabaka olarak ele alınır.

Analiz modülü ile analiz edilebilecek maksimum tabaka sayısı 20’dir. Bu program dahilinde yapılan alt tabakaları da içeren, üstyapı strüktüründeki alt-tabakaların toplam sayısına karşılık gelmektedir. Tasarım kılavuzu yazılımının bağlayıcısız bir malzemenin bir “granüler temel” veya “taban zemini” olarak tayin edilmesini gerektirdiği unutulmamalıdır, eğer bir üstyapı strüktürü, bağlayıcısız temel malzemesinden oluşan bir veya birden fazla kalın tabakayı içeriyormuş gibi girilirse, bu durum program tarafından analiz edilemeyen 20 tabakadan fazlasıyla sonuçlanabilir. Bu etkiye yönelik bir mesaj ekranda gözükecektir ve kullanıcı tabakalandırma sisteminde değişiklik yapmak zorunda kalacaktır. Bu değişiklik, bağlayıcısız temel malzemesi kalınlığının azaltılmasıyla ve daha kalın alt-tabakalara tekrar bölünmüş bir taban zemini tabakası olarak benzer bir malzemenin eklenmesiyle kolaylıkla gerçekleştirilebilir. (Örneğin; 60 in (150 cm)’lik bir A-1-a granüler temel, 24 in (60 cm)’lik A-1-a temel tabakasına ve 36 in (90 cm)’lik A-1-a taban zemini tabakasına dönüştürülebilir. Arzu edildiği kadar çok “taban zemini tabakasının olabileceği unutulmamalıdır.

8.3.7.7 Kaya Tabanı

Üstyapı yüzeyine 10 ft (3 m) mesafede kaya tabanının varlığı üstyapı tabakalarının yapısal tepkilerini etkiler. Bu tabaka için girdiler şunları içerir:

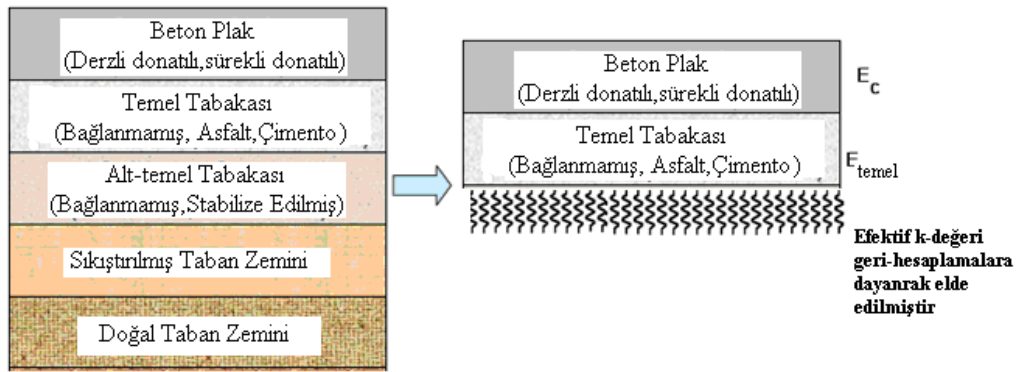
- Birim ağırlık,
- Poisson oranı,
- Tabaka modülleri.

Düzey 1 ve 2 girdileri kaya tabanını içermez. Katı veya yüksek derecede çatlaklı ve ayrılmış gibi çeşitli koşullardaki kaya tabanları için tipik modüllerin değerleri kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur.

8.3.7.8 Taban Esneklik Modülünün Taban Zemini Reaksiyonunun Efektif Dinamik Modülüne Çevrilmesi

Bu tasarım kılavuzundaki, tüm üstyapı tipleri için taban zemini ve bağlayıcısız üstyapı tabakaları esneklik modülünün kullanımıyla karakterize edilir. Rijit üstyapı tasarımında; gerçek üstyapı strüktürünün, Şekil 8.14'te görüldüğü gibi portland çimentosu betonu plaktan temelden ve efektif dinamik k-değerinden meydana gelen eş değer bir yapıya dönüştüren bir çevrim prosesiyle elde edilen yapısal analiz için taban zemini k-değerine ihtiyaç duyulur.

Bu yaklaşım; tüm üstyapı tasarımlarının taban zemini ve diğer üstyapı tabakaları için aynı girdilerin kullanımıyla tamamlanmasını sağlar. “E’nin k’ya” çevrimi tasarım kılavuzu yazılımının dahilinde, girdi işlenmesinin bir parçası olarak yürütülür.



Şekil 8.14: Rijit üstyapıların yapısal tepki hesaplamaları için yapısal model [15]

8.3.7.9 Efektif Dinamik k-Değerinin Hesaplanması

Efektif dinamik k-değeri; tasarım için tanımlanan tüm tabakaları modelleyen bir elastik tabaka programının (JULEA) kullanımıyla, portland çimentosu betonu yüzeyinin belirlenen ilk defleksiyon profilinden elde edilir. Taban zemini esneklik modülü; laboratuardaki esneklik modülü testinde kullanılan gerilme farkı ile karşılaştırıldığında aynı derecedeki genellikle bir beton plağın ve temel tabakasının altında var olan daha düşük gerilme farklarını yansıtmak için ayarlanır. Daha sonra hesaplanmış defleksiyon profili efektif dinamik k-değerinin geri hesaplanmasında kullanılır. Bu bakımdan efektif dinamik k-değeri hesaplanan bir değer olup tasarım prosedüründeki direkt bir girdi değildir (rehabilitasyon dışında).

Bu kılavuzda kullanılan efektif k-değeri daha önceki tasarım prosedürlerinde kullanılan geleneksel statik k-değerlerinde ayırt edilmesi gereken bir dinamik k-değeridir. Her bir zaman artımı (ay) için efektif dinamik k-değerinin elde edilmesinde kullanılan prosedürün şu adımlarla taslağı çıkartılmıştır:

1. Esnek üstyapı tasarımı ile tutarlı bir anlamda tabaka parametreleri (E ve poisson oranı) atanır (kılavuzda; BÖLÜM 3, Kısım 3),
2. Elastik tabaka programı olan JULEA programı kullanılarak 9000 lb (4 ton)'lık düşen ağırlıklı deflektometre (Falling Weight Deflectometer-FWD) ile yüklü 5.9 inch (15 cm) yarı çaplı plak taklit edilir ve yükleme plağı merkezinden 0, 8, 12, 18, 24, 36 ve 60 in (0, 20, 30, 45, 60, 90 ve 150 cm) mesafede portland çimentosu betonu yüzey defleksiyonları hesaplanır.
3. Portland çimentosu betonu plak ve temel altındaki düşürülmüş gerilme farkı düzeyinin açıklanması için taban zemini esneklik modülü ayarlanır.
4. Yeniden hesaplanmış taban zemini esneklik modülü ve alt-temel modülü ile birlikte, 9000 lb (4 ton)'lık FWD ile yüklenmiş 5.9 inch (15 cm) yarı çapındaki plağı taklit eden elastik tabaka programı JULEA yine kullanılır.
5. Yükleme plağının merkezinden 0, 8, 12, 18, 24, 36 ve 60 inch'teki (0, 20, 30, 45, 60, 90 ve 150 cm) portland çimentosu betonu yüzey defleksiyonları hesaplanır.
6. Portland çimentosu betonu yüzey defleksiyonları kullanılarak taban zemini reaksiyonunun dinamik modülünün hesaplanması için "Best Fit Method"u kullanılır.

"Efektif" dinamik k-değeri, portland çimentosu betonu plağı ve temel tabakası altındaki tüm tabakaların sıkışabilirliğini göstermektedir. Örneğin; üstyapı kaya tabanının yüzeye yakın olduğu (10 ft-3 m'den az) bir alanda inşa edilirse, bu durumda kaya tabanı taban zemini tabakasının altındaki bir rijit tabaka (yüksek elastik modül) olarak girilir. Portland çimentosu betonu yüzey defleksiyonlar kaya tabanı tabakasının varlığını yansıtan JULEA'nın kullanımı ile hesaplanır. Dolayısıyla, kaya tabanı tabakasının varlığı efektif dinamik k-değeri hesaplamasına yansıtılmış olunur. Taban zemininin efektif dinamik k-değeri yılın her bir ayı için hesaplanır ve üstyapının tasarım ömrü boyunca artımlı hasar birikimindeki kritik gerilmelerin ve defleksiyonların hesaplanması için bu değerden direkt olarak

yararlanılır. Yeraltı su seviyesi derinliği, kaya tabanının derinliği ve don penetrasyon derinliği gibi faktörler efektif dinamik k-değerini kayda değer derecede etkileyebilmektedir. Bu faktörlerin tümü EICM’de dikkate alınmıştır.

8.3.8 Üstyapı Tasarımının Göze Çarpan Özellikleri

Çeşitli tasarım özelliklerinin hem derzli donatısız tipteki hem de sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı üzerinde kayda değer etkisi vardır. Bunların örnekleri derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için derz aralıklarını ve kenar desteğini (bağlanmış rijit banket veya genişletilmiş plak), sürekli donatılı rijit üstyapılar içinse donatı içeriğini ve temel tipini içermektedir. Bu kısımda göze çarpan bu tasarım özellikleri ile ilişkili olan girdiler üzerinde durulmuştur. Üstyapı tasarımının göze çarpan özelliklerinin ek detayları derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için Kısım 8.4’te ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için Kısım 8.5’te sunulmuştur.

8.3.8.1 Sıcaklık Farklılıklarından Doğan Kalıcı Kıvrılma/Eğrilme

Kalıcı kıvrılma/eğrilmenin (Kısım 8.3.5) magnitudü tüm rijit üstyapı performansını etkileyen hassas bir faktördür. Efektif kalıcı kıvrılma/eğirmeyi etkileyen faktörlerin bazıları şunları içermektedir:

- Portland çimentosu betonunun yerleştirilmesi sırasındaki iklim (hava sıcaklığı, güneş ışıınımı, bağıl nem, rüzgar hızı),
- İnşa zamanı ve kür prosedürü (hidratasyon ısısına ek olarak şiddetli güneş ışıınımlı sabah inşası, güneş ışıınımının olmadığı gece inşası, kür bileşenlerinin tipi ve ıslak kür),
- Çimento tipi, su/çimento oranı, su içeriği, çimento içeriği ve agrega tipini içeren portland çimentosu betonu karışım özellikleri kendi ağırlığından ve kenar baskılarından dolayı portland çimentosu betonu plağının sünmesi,
- Temel tipi ve özellikleri.

İnşadan sonraki plak eğriliği oldukça değişkendir ve elverişsiz faktörlerin kombinasyonu (örneğin; portlanda çimentosu betonu karışımının yüksek rötresi, portland çimentosu betonunun sertleşmesi sırasındaki aşırı sıcaklık gradiyenti ve zayıf kür) zamanından önce ortaya çıkan yukarıdan-aşağıya çatlamalarla sonuçlanan

aşırı derecede yüksek olan kalıcı kıvrılma/eğrilmelere yol açabilir. Bununla birlikte, mevcut kalibrasyon sonuçları; uzun dönemli efektif kalıcı kıvrılma/eğrilmenin ortalama değerlerinin, iklim ve plak kalınlığı ile temel tipini içeren tasarım faktörlerine dayanan herhangi bir sabit yönlü apaçık bir hata olmadan, oldukça uniform olduğunu göstermektedir. Tüm iklim bölgelerindeki bütün yeni ve yeniden inşa edilen rijit üstyapılar için, optimizasyonla elde edilerek önerilen, kalıcı kıvrılma/eğrilme değeri -10°F 'dir. Bu değer, plağın üstünden altına lineer sıcaklık farklılığı ile eşdeğerdir. Ek KK kalıcı kıvrılma/eğrilme ile ilgili ayrıntıları sunmaktadır.

Bu parametrede bir artışın veya azalmanın garanti edilebileceği yerlerde, çeşitli tasarım durumları meydana gelmektedir. Örneğin; gece süresince yürütülen inşaların, geceleyin güneş ışıınımı olmamasından dolayı, daha düşük bir değerle sonuçlanması gerekir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların çatlama modelinin kalibrasyonu sırasında teşhis edilen diğer bir örnek; kayma donatısız bir enine derzin altında kayda değer miktarda erozyonun meydana gelmesinden kaynaklanan desteklik kaybının, yukarıdan-aşağıya gerilmenin artışı ile sonuçlandığını göstermiştir. Bu, terk edilen kenar üzerindeki enine derz yakınında bir enine çatlağa sıklıkla neden olur. Kalıcı kıvrılma/eğrilme için artırılmış bir değer (-15°F) kullanılması bu kritik durumun açıklanmasına yardımcı olur ve zamanla gelişen çatlamların miktarını daha doğru olarak önceden bildirir. Bu durumun, kayma donatılarının ve aşınmaya daha dirençli bir temel tabakasının kullanımıyla daha iyi bir şekilde kontrol altında tutulabileceği unutulmamalıdır. Bununla birlikte bölgesel kalibrasyonlar inşaada daha açık bir biçimde belirlenen değişken koşullara rehberlik etmedikçe varsayılmış olan değer kullanılması önerilir.

8.3.8.2 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarımında Göze Çarpan Özellikler

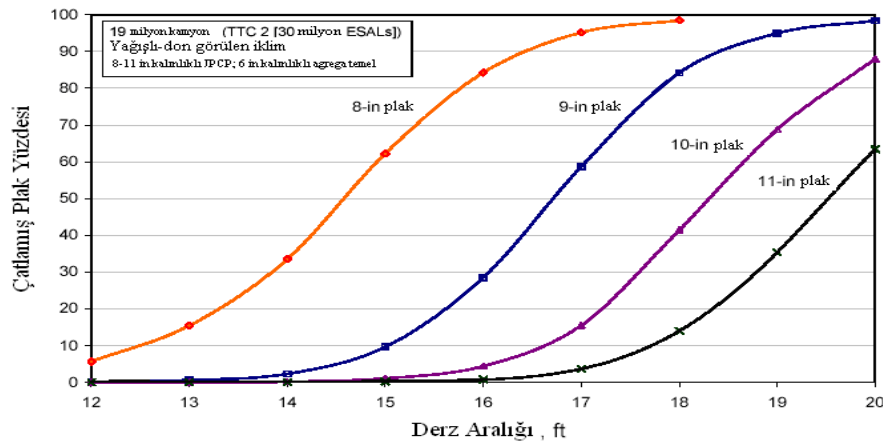
Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların performansına direkt etkisi olan tasarım özellikleri şunlardır:

- **Derz Aralığı**

Derz aralığı; derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yapısal ve fonksiyonel performansı ile birlikte inşa ve bakım maliyetlerini etkileyen kritik bir derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı faktörüdür. Derz aralığının artmasıyla, derzli

donatısız tipteki rijit üstyapılarda gerilmeler hızlı bir biçimde artar. Derz aralığının artmasıyla aynı zamanda, daha küçük bir derecede de olsa derz bozulmaları da artar. Derz aralığının; plak kalınlığı, plak genişliği, portland çimentosu betonu malzemesi özellikleri, temel tipi ve taban zemini rijitliği gibi tasarım özellikleri bağlamı içinde seçilmesi gerekir. Belirli bir derz aralığı, verilmiş olan bir takım tasarım özellikleri için uygunken diğer bir takım tasarım özellikleri için yeterli olmayabilir. Şekil 8.15'te, plak kalınlığı ile derz aralığı arasındaki etkileşim gösterilmiştir.

Genellikle kısa bir derz aralığı (örneğin; 15 ft-4.5 m) önerilir. Bununla birlikte, minimum şerit genişliği 12 ft olduğu için 12 ft'ten az derz aralıklarına gerek yoktur. Eğer rasgele derz aralıkları kullanılırsa, bozulma performanslarının değerlendirilmesi için ortalama derz aralığı kullanılabilir. Ama kısa ve uzun plaklardaki enine çatlamların ayrı olarak değerlendirilmesi gerekir. Örneğin; eğer 12-13-19-18 ft'lik (3.6-3.9-5.7-5.4 m) derz aralığı modeli kullanılırsa, 12 ve 13 ft'lik (3.6 ve 3.9 m) panellerin 13 ft'lik (3.9 m) derz aralığı kullanılarak, 18 ve 19 panellerin 19 ft'lik (5.7 m) derz aralıklarının kullanımıyla gruplandırılması ve analiz edilmesi gerekir. İki tasarımdan elde edilen ortalama çatlama, rasgele derz kesiminden beklenen çatlama değildir. Rasgele derz aralığı girildiği takdirde, tasarım kılavuzu yazılımı, bozulma analizi için ortalama derz aralığını ve çatlama analizi için maksimum derz aralığını kullanır.



Açıklayıcı Bilgiler

1 in = 25.4 mm

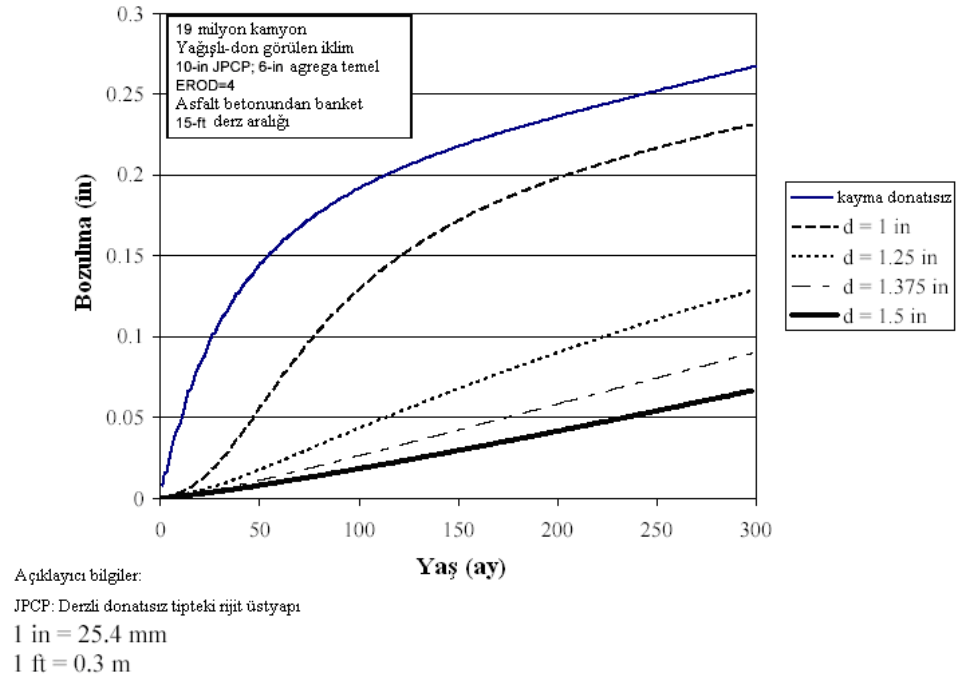
1 ft = 0.3 m

JPCP: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı

Şekil 8.15: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların plak kalınlığına ve derz aralığına olan duyarlılığı [15]

- **Kayma Donatısı Çapı ve Aralığı**

Kayma donatılı üstyapılar için, kayma donatısı çapı ve aralığı kritik tasarım girdileridir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmaları kayma donatısı çapına oldukça duyarlıdır. Şekil 8.16'da, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bozulmaların kayma donatısı çapına olan duyarlılığı gösterilmiştir. Tipik olarak, gerekli plak kalınlığı arttıkça (daha ağır trafik, plak çatlamalarının kontrol edilebilmesi nedeniyle), derz bozulmalarının kontrol edilmesi için kayma donatısı çapında bir artışa gerek duyulur. Kayma donatısı çapındaki bir artışa karşılık olan plak kalınlığının artışının, plak kalınlığına bağlı olan donatının efektif alanındaki bir azalma nedeniyle, tahmin edilen derz bozulmalarında küçük bir artışa neden olacağı unutulmamalıdır.



Şekil 8.16: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının kayma donatısına olan duyarlılığı [15]

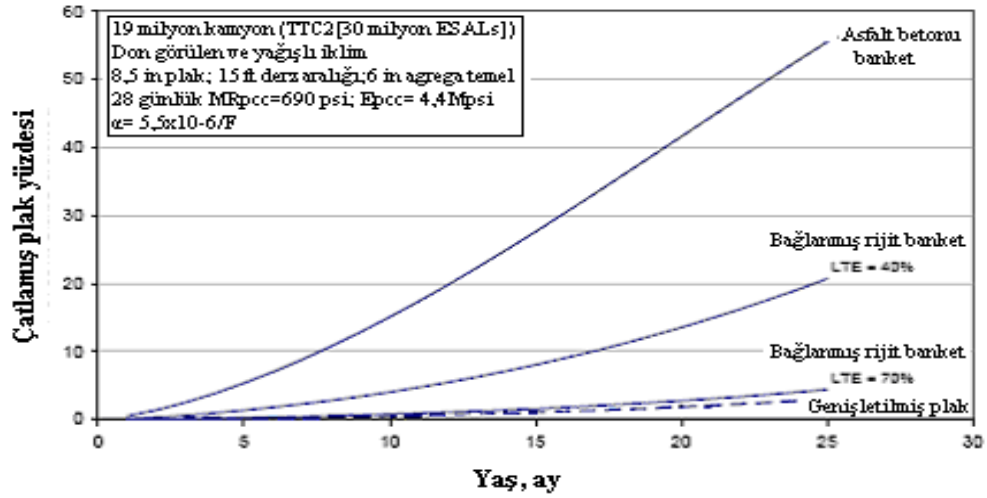
- **Sızdırmazlık Elemanı Tipi**

Sızdırmazlık elemanı tipi, kabarıp dökülmelerin önceden tahmininde kullanılan ampirik modelin girdisidir. Kabarıp dökülme düzgünlük tahmininde kullanılır. Fakat bu tasarım kılavuzunda bu girdi bir performans ölçütü olarak direkt bir şekilde

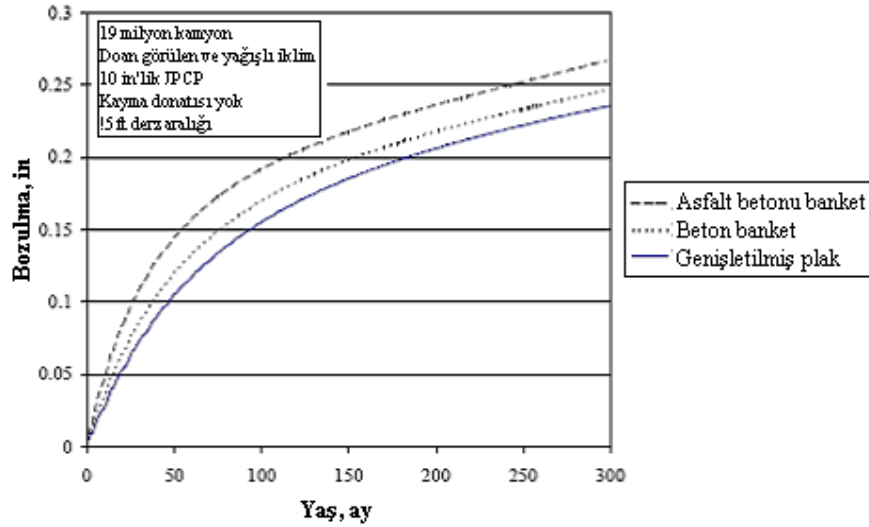
dikkate alınmaz. Sızdırmazlık elemanı seçenekleri; likit, silikon ve hazır olarak gruplandırılabilir.

- **Kenar Destekliği**

Bağlanmış portland çimentosu betonu banketler ve genişletilmiş plaklar; kenar boyunca kritik defleksiyon ve gerilmeleri azaltarak derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların performansını kayda değer derecede iyileştirir. Banket tipi aynı zamanda, Kısım 8.3.6'da üzerinde durulduğu gibi, üstyapı strüktürü içine sızan su miktarını da etkiler. Su sızıntısının etkileri bağlayıcısız tabakaların mevsimsel modül değerlerinin saptanmasında kullanılır. Kenar destekliğinin göze çarpan yapısal etkileri, çatlamlar için Şekil 8.17'de ve derz bozulmaları için Şekil 8.18'de görüldüğü gibi, tasarım sürecinde direkt olarak dikkate alınır. Göze çarpan bu tasarım özellikleri için tasarım girdileri şöyledir:



Şekil 8.17: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kenar destekliğinin enine çatlamlar üzerindeki etkisi [15]



Şekil 8.18: Kayma donatısız derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kenar destekliğinin enine çatlamlar üzerindeki etkisi [15]

- Bağlanmış Portland Çimentosu Betonu Banket- Bağlanmış portland çimentosu betonu banketler için şerit ile banket arasında uzun vadeli yüktransfer etkinliğinin sağlanması gerekir. Yük transfer etkinliği yüklenmemiş ve yüklenmiş plakların defleksiyonlarının oranı olarak tanımlanır. Daha yüksek yük transfer etkinliğiyle sağlanan banket destekliği plak ana hatlarındaki kritik tepkilerini küçültür. Tipik olarak uzun vadeli yük transfer etkinliği değerleri şöyledir:
 - Monolitik olarak inşa edilmiş ve bağlanmamış portland çimentosu banketler için %50'den %70'e kadar.
 - Ayrılmış olarak inşa edilen bağlanmış portland çimentosu banketler için %30'dan %50'ye kadar.
 - Bağlanmamış rijit banketler ve diğer tipteki banketler kayda değer bir desteklik sağlamazlar. Bu yüzden düşük bir yük transfer etkinliği değerinin kullanılması gerekir. (Örneğin; genişletilmiş temel tabakasından desteklik nedeniyle %10).
- Genişletilmiş Plak- Genişletilmiş plaklar, tekerleklerin izlediği rotayı kritik yüklemelerin meydana geldiği üstyapı kenarından uzağa etkili olarak taşıyarak derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların performansını geliştirir.

Genişletilmiş plak için tasarım girdisi, 12 ft (3.6 m) ile 14 ft (4.2 m) arasında değişen plak genişliğidir.

- **Temel Aşınabilirliği**

Temel veya taban zemininin erozyon potansiyelinin üstyapı bozulmalarının başlaması ve yayılması üzerinde önemli bir etkisi vardır. Uzun vadeli aşınabilirlik davranışına dayalı olarak, farklı temel tipleri şöyle sınıflandırılır:

- 1. Sınıf- Erozyona karşı olağanüstü dirençli malzemeler,
- 2. Sınıf- Erozyona karşı çok dirençli malzemeler,
- 3. Sınıf- Erozyona karşı dirençli malzemeler,
- 4. Sınıf- Oldukça aşınabilir malzemeler,
- 5. Sınıf- Çok aşınabilir malzemeler.

Çeşitli kategoriler altında malzeme tiplerini nitelendiren titiz tanımlamalar kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur. Tasarım girdisi aşınabilirlik sınıfıdır.

- **Portland Çimentosu Betonu / Temel Tabakası Ara-yüzeyi**

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı için; stabilize bir temel ile portland çimentosu betonu plak arasındaki yüzey ya tamamen bağlanmış ya da bağlanmamış olarak modellenir. Bir stabilize temelin yapısal katkısı, eğer plağa tamamıyla bağlanmış ise kayda değerdir. Stabilize temeller (özellikle bitüm ile stabilize edilen temeller) sıklıkla plağa bağlanırlar ve plak dahilinde yürütölen defleksiyon testleri tipik olarak bir bağlanmış tepki gösterir. Bununla birlikte, trafik yüklemelerinin ve çevresel koşulların etkisi zamanla kenarların yakınlarında bu bağı zayıflatmaya yöneliktir ve tüm tasarım periyodu boyunca bağlanmış-arayüzey varsayımı mantıklı olmayabilmektedir.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı, belli bir zaman periyodu boyunca ara-yüzey bağ koşullarındaki değişimin modellenmesini içermektedir. Hangi üstyapı yaşında bağın ortadan kalktığının belirtilmesiyle bunun üstesinden gelinir. Bağın ortadan kalktığı yaşa kadar plak-temel ara-yüzeyi tamamıyla bağlı olarak farz edilir. Bağın ortadan kalktığı yaştan sonra ara-yüzey ile plak arasında herhangi bir bağın olmadığı farz edilir. Tasarım girdisi bağın ortadan kalktığı aylar içindeki üstyapı

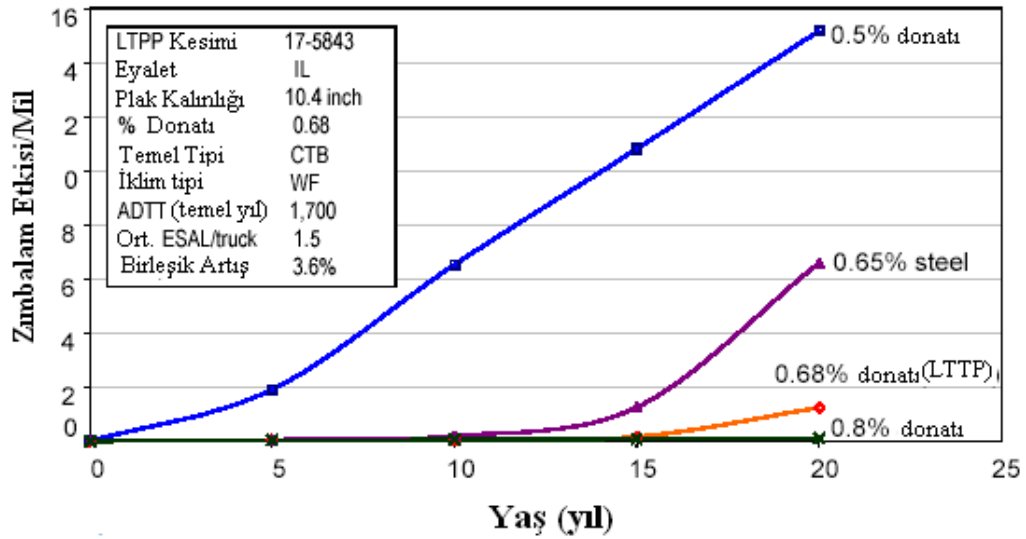
yaşıdır. Genellikle, bağın ortadan kalktığı yaştan 5 yıldan (60 ay) fazla belirlenmesi önerilmez ve kalibrasyonda kullanılmaz.

8.3.8.3 Sürekli Donatılı Rijit Üstyapı Tasarımında Göze Çarpan Özellikler

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansına direkt etkisi olan tasarım özellikleri şunlardır:

- **Donatı Tasarımı**

Boyuna donatı, enine çatlakların açılmasını kontrol eden önemli bir tasarım parametresidir. Çatlak genişliği (donatı seviyesindeki) oldukça önemlidir ve donatı seviyesindekilerin 0,02 in (0.05 cm)'den az olacak şekilde tasarımda direkt olarak sınırlandırılması gerekir. Enine çatlakların yük transfer etkinliği %95'ten fazla olmalıdır. Donatı tasarımı aynı zamanda, bu parametrenin çatlak aralığı üzerindeki etkisinin bakış açısı bakımından da kritiktir. Saha çalışmaları, artırılmış donatı içeriğinin tipik olarak çatlak aralığını kayda değer derecede azalttığı halde (aynı tasarım ve inşa koşulları için) daha az zımbalama etkisiyle ve artan düzgünlükle sonuçlandığını göstermiştir (Şekil 8.19). Donatı tasarımı ile ilişkili girdiler şunlardır:



Şekil 8.19: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda donatı içeriğinin zımbalama etkisi üzerindeki etkisinin gösterimi [15]

- Donatı yüzdesi- Donatı içeriği; portland çimentosu betonu enkesitindeki donatı enkesit alanının bir yüzdesi olarak tanımlanır. 0,60'tan 0,70'e kadar olan donatı yüzdeleri uygun çatlama örnekleri sağlamıştır ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performans sınavını geçmiştir. Bununla birlikte;

çatlak genişliğinin 0,02 in (0.05 cm)'den az ve yük transfer etkinliğinin %95'ten fazla olacak şekilde korunması için, uzun tasarım ömürleri ile birlikte yüksek hacimdeki ağır taşıtlara maruz kalan karayolları için daha yüksek bir donatı yüzdesi (örneğin; 0,70'ten 1,00'a kadar) istenebilir. Verilmiş olan bir proje için, donatı yüzdesinin zımbalama etkisi gelişimi üzerindeki tipik etkisi 8.19'ta gösterilmiştir.

- Donatı çapı- Donatı çubuğunun çapı (tipik olarak 5/8'den ¾'e kadar olan donatı çapları başarıyla kullanılmıştır).
- Donatı derinliği- Üstyapı yüzeyinden donatı demirinin merkezine olan derinlik. Minimum donatı derinliği 3,5 in (9 cm) ve maksimum donatı derinliği orta-derinlik olarak önerilmiştir. Çalışmalar, yüzeye daha yakın olan donatı yerleşiminin en dar çatlaklarla ve daha düşük punchoutlarla sonuçlandığını göstermiştir. Bu etki, tasarım kılavuzu tahmininde yansıtılmıştır.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda çatlama örnekleri üzerindeki enine donatının etkisi bu kılavuzda direkt olarak dikkate alınmamıştır. Enine donatı normalde, boyuna donatıların sehpa üzerine yerleştirilmesini kolaylaştırmak için sağlanır.

• Temel Özellikleri

Temel tipi ve malzeme karakteristikleri; çatlak aralığını ve dolayısıyla sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların inşa maliyetleri ile birlikte çatlak genişliğini, plak destekliğini, erozyonu (desteklik kaybı), zımbalama etkisini ve düzgünlüğü etkileyen kritik durumdaki göze çarpan özelliklerdir. Bu faktörler, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansını kuvvetle etkileyebilmektedirler. Temel özellikleri, şu girdiler kullanılarak karakterize edilir:

- Temel modülü ve kalınlığı- Bir iyileştirilmiş temelin modülü ve kalınlığı, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı plağının yapısal kapasitesine katkıda bulunur.
- Temel aşınabilirliği- temel aşınabilirliği temel tipi ile tanımlanır ve şu kategoriler içinde sınıflandırılır:
 - 1. Sınıf- Erozyona karşı olağanüstü dirençli malzemeler,
 - 2. Sınıf- Erozyona karşı çok dirençli malzemeler,

- 3. Sınıf- Erozyona karşı dirençli malzemeler,
- 4. Sınıf- Oldukça aşınabilir malzemeler,
- 5. Sınıf- Çok aşınabilir malzemeler.

Çeşitli kategoriler altında temel tiplerini nitelendiren tanımlamalar, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur. Tasarım girdisi aşınabilirlik sınıfıdır.

- Temel tabakası/plak sürtünme katsayısı- temel malzemesinin sürtünme katsayısı. Farklı temel tipleri için kalibrasyonda kullanılan tipik değerler Tablo 8.2’de özetlenmiştir (Not: Tüm kalibrasyon kesimlerinden elde edilen ortalama değerlerinin saha çatlak aralıkları ile eşleştirilmesi istenmektedir). Temel/plak sürtünme katsayısı üzerine daha detaylı bilgiler, kılavuzda; Ek LL’de verilmiştir. Yerel kalibrasyon farklı bir şekilde göstermedikçe, tasarım için ortalama sürtünme katsayılarının kullanılması önerilmektedir.

Tablo 8.2: Tasarımda kullanılması için önerilen temel/plak tipik sürtünme katsayı değerleri [15]

Taban zemini/ Temel Tipi	Sürtünme Katsayısı (düşük-orta-yüksek)
İnce taneli zemin	0.5 – 1.1 – 2
Kum*	0.5 – 0.8 – 1
Agrega	0.5 – 2.5 – 4.0
Kireçle stabilize edilmiş kil *	3 – 4.1 – 5.3
Asfaltla stabilize edilmiş temel	2.5 – 7.5 – 15
Çimentoyla stabilize edilmiş temel	3.5 – 8.9 – 13
Toprak-çimento	6.0 – 7.9 – 23
Grobeton	3.0 – 8.5 – 20
Kürlenmemiş grobeton	> 36 (higher than LCB cured)

*Temel tipi kalibrasyon kesimlerinde yoktur veya göz önüne alınmamıştır

• Çatlak Aralığı, Çatlak Genişliği ve Çatlak Yük Transfer Etkinliği

Çatlak aralığı sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı performansını etkileyen egemen faktör olan çatlak genişliğini etkileyen kritik bir faktördür. Tasarım kılavuzu yazılımı aracılığıyla hesaplanan çatlak genişliği; donatı derinliğindeki çatlak genişliği olup yüzeydeki daha geniş olan çatlak genişliği değildir. Çatlak genişliği zamanla artar ve anahtar tasarım kriteri olarak kullanılabilir. Donatı içeriğinin, portland çimentosu betonu karışım parametrelerinin ve temel tipi sürtünmenin uygun seçimi sayesinde, tasarımcı 0,02 in (0.05 cm)’den daha küçük olan kabul edilebilir ortalama çatlak genişliğini elde edebilir. Ortalama çatlak aralığı direkt olarak belirlenebilir yada tasarım girdilerine dayalı tasarım kılavuzu yazılımına bir modelin dahil edilmesiyle

tahmin edilebilir. Çatlak açılmaları için yapılan hesaplamalar ortalama çatlak aralığına dayalıdır. Önerilen maksimum çatlak aralığı 6 ft (1.8 m)'dir. Bununla birlikte çatlak genişliği ve yük transfer etkinliği anahtar tasarım kriterleridir.

- **Banket Tipi**

Sürekli donatılı tipteki bir rijit üstyapı, bağlanmış portland çimentosu betonuyla veya asfalt betonundan bir banket ile birlikte dizayn edilebilir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı trafik şeritleri için tipik banket tasarımı kayma donatılarının olmadığı bir sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı (trafik şeritleri ana hattından sonra yerleştirilir) yada bir asfalt betonu bankettir. Saha verileri, şerit-banket derzindeki yük transferinin yeterli olması durumunda, bağlanmış-portland çimentosu banketlerin sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda görülen zımbalama etkisini kayda değer bir azalttığını göstermiştir. Bağlanmış banket, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı kenarlarında defleksiyonu azaltır. Anahtar tasarım kriterleri; banket ile trafik şeridi arasındaki bağı, banket altındaki temel tabakası malzemesinin aşınabilirliğini ve düzenli trafikteki acil durumlar, kapasitenin artırılması ve park edebilme alanları oluşturabilmek için banket kullanımını içermektedir. Tasarım girdisi banket tipidir.

8.4 Derzli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Etmenleri

Birçok faktöre dayalı olan derzli donatısız tipteki üstyapı performansı ve tasarım çözümleri kesinlikle eşsizdir. Tasarım amaçları, tasarım özelliklerinin birçok kombinasyonunun kullanılmasıyla elde edilebilir. Aynı zamanda, üstyapı performansının iyileştirilmesi ve zayıf performans riskinin azaltılması için çeşitli tasarım özellikleri de kullanılabilir. Örneğin; zayıf veya değişken taban zemini koşullarının olduğu yerlerde hem dayanımın hem de temel desteğinin uniformluğunun iyileştirilmesi için stabilize bir temel ve bir agrega alt-temel kullanılabilir. Stabilize bir temel aynı zamanda, erozyona karşı daha dirençlidir ve yüksek hacimli ağır kamyonlar için tasarımın gerçekleştirildiği durumlarda, zayıf performans riskini azaltan önemli bir nitelik olabilmektedir. Uzun tasarım periyotları için (örneğin; 50 yıl), yüzey altı drenaj; uzun-vadeli yeterli malzeme performansının sağlanması bakımından önem taşır. Tasarım koşullarının ve mevcut seçeneklerin dikkatle göz önüne alınması optimum tasarımın elde edilmesinde önemli rol oynar. Bu bölümde derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken faktörler üzerinde durulacaktır.

8.4.1 Plak Kalınlığı

Plak kalınlığı; performans ve maliyet bakış açıları bakımından göze çarpan en kritik tasarım özelliklerinden biridir. Genellikle, plak kalınlığı arttıkça kritik eğilme gerilmeleri ve defleksiyonların azalması ile birlikte çatlama ve derz bozulmalarında azalma görülür. Saha ve analitik çalışmalar, plak kalınlığının artmasıyla, plak çatlama ve derz bozulmalarının büyük oranda ve derz bozulmalarının biraz azaldığını göstermiştir. Plak kalınlığı, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların çatlama performansını etkileyen en egemen faktördür. Bununla birlikte; derz aralığını, kenar destekliğini, portland çimentosu betonu özelliklerini (dayanım, termal genişleme katsayısı, rötre ve elastik modül) ve temel tiplerini kapsayan diğer çeşitli tasarım faktörleri de derzli donatısız tipteki rijit üstyapı çatlama ve derz bozulmalarını etkiler. Bu yüzden plak kalınlığının bu tasarım faktörlerinin ve iklim bağlamında seçilmesi gerekir. Verilmiş olan birtakım tasarım koşulları için yeterli olan bir plak kalınlığı, diğer birtakım tasarım özellikleri için tamamen yetersiz olabilir. Amaç; istenilen güvenilirlik düzeyinde tasarım periyodu boyunca kabul edilebilir düzeylerdeki enine çatlama ve derz bozulmalarını ve düzgünlüğü (IRI) sağlayan minimum plak kalınlığının seçilmesidir.

8.4.2 Plak Genişliği

Tipik olarak, plak genişliği şerit genişliği ile (genellikle 12 ft (3.6 m)) eş anlamlı olmaktadır. Birkaç eyalet ve diğer ülkeler, performansın iyileştirilmesi için şerit genişliği ile aynı tutulan daha geniş plakları kullanmaktadırlar. Saha ve analitik çalışmalar, daha geniş plakların, kamyon dingillerini kritik gerilmelere ve defleksiyonlara neden olabilecekleri serbest uç ve köşelerden iyice uzak tutarak derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama ve derz bozulmalarının performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Serbest-uçlardaki yükleme koşullarının giderilmesi veya etkili olarak azaltılması tipik servis koşulları altında meydana gelen maksimum gerilmelerde ve defleksiyonlarda önemli bir azalma ile sonuçlanır ve çatlama ve derz bozulmaları aşağıya çekilmiş olur. Bununla birlikte, genişletilmiş plaklı bazı kesimler; tekerlek yolundaki boyuna çatlama ve derz bozulmalarının artan bir eğilim göstermiştir. Tasarım kılavuzunda bu tür çatlama ve derz bozulmaları hitap edilmemiştir. Bu bakımdan, genişletilmiş plak tasarımının diğer tasarım özelliklerini tam olarak göz önünde bulundurmadan kullanılmaması gerekir.

8.4.3 Portland Çimentosu Beton Malzemeleri

Portland çimentosu betonu malzeme özelliklerinin en önemlisi durabilitedir. Tasarım kılavuzu yazılımındaki tüm tasarım analizleri, malzemenin tüm tasarım periyodu boyunca görevini iyi şekilde yerine getireceği farz edilerek yapılır. Tahmini üstyapı performansı yalnızca, D-çatlamaları veya alkali-silika reaktifliği gibi durabilite problemlerinin gelişiminin zamanından önce ortaya çıkan başarısızlıklara sebep olmadığı durumlar için geçerlidir. Bu ölçütler, yüzey altı drenajı ile birlikte portland çimentosu betonu bileşenlerini kapsar. Malzeme durabilitesi özellikle uzun bir tasarım periyodu (örneğin; 50 yıl) seçildiği takdirde büyük önem taşır. Portland çimentosu betonunun durabilite konusu üzerindeki ayrıntılar, kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’de sunulmuştur.

Eğilme dayanımı, elastisite modülü, kuruma büzülmesi, termal genleşme katsayısı, termal iletkenlik ve ısı kapasitesi gibi portland çimentosu betonunun malzeme özellikleri tasarım yazılımında direkt olarak dikkate alınmıştır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı performans bu parametrelerin çoğuna oldukça duyarlı olabilmektedir. Örneğin; portland çimentosu betonunun eğilme dayanımının çatlama üzerindeki kayda değer derecede yüksek etkisi iyi bilinmektedir. Aynı zamanda, termal genleşme katsayısı; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda eğilme gerilmelerini ve derz açılmalarını etkileyen oldukça hassas bir faktördür. Ayrıca, rötrenin derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların hem çatlamaları hem de derz bozulmaları üzerinde etkisi vardır.

Genellikle, verilmiş olan herhangi bir portland çimentosu beton karışımının eğilme dayanımının artışıyla portland çimentosu betonunun elastik modül değeri de artar. Dayanımdaki bir artış yorulma hasarlarını azaltır; ancak, dayanımdaki artışa bağlı olarak ortaya çıkan elastisite modülündeki artış eğilme gerilmelerini de artıracaktır. Bundan dolayı, portland çimentosu betonunun dayanımının artışı ile yorulma hasarlarındaki azalma genellikle inanıldığı kadar çarpıcı değildir. Ayrıca; artırılan çimento içeriği ile elde edilen daha yüksek bir portland çimentosu betonu dayanımı, sertleşmiş karışımın daha yüksek bir rötresiyle ve daha yüksek bir portland çimentosu betonu ısı genleşme katsayısı (α_{pcc}) ile sonuçlanır. Daha yüksek rötre ve ısı genleşme katsayısı ise yukarıdan-aşağıya gerilmelerde (top-down stresses) artışa neden olan daha büyük ölçüdeki çarpılmaya ve kıvrılmaya neden olur.

Verilmiş olan herhangi bir karışımda portland çimentosu betonu modülü ile dayanım arasında karşılıklı bir ilişki bulunması ile birlikte portland çimentosu betonu modülü agrega tipine bağlı olarak oldukça değişken olabilmektedir. Portland çimentosu betonu modülünün gerilme üzerindeki etkileri oldukça dikkate değerdir. Bundan dolayı, verilmiş bir portland çimentosu betonu dayanımı için, daha düşük modüllü bir karışım kayda değer derecede daha iyi çatlama performansı ortaya koyacaktır. Buna karşın; kırılmalara etki eden en baskın faktörün bağlantı donatısı çapı olması ile birlikte daha küçük bir modül kırılma performansı üzerinde zararlı etkileri olabilecek daha büyük defleksiyonlara yol açar.

Aşağıda çeşitli portland çimentosu betonu özelliklerinin derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların performansı üzerindeki etkileri kısaca özetlenmiştir:

- Portland çimentosu betonu dayanımı- Portland çimentosu betonu dayanımının yükseği tüm derzli donatısız tipteki üstyapıların performansı için daha iyidir. Fakat verilmiş bir malzeme için daha yüksek bir dayanıma, yararlı etkilerini azaltan daha yüksek bir modül eşlik eder. Bununla birlikte eğer daha yüksek çimento içeriği ile elde edilirse, artan rötre ve ısı genleşme katsayısı daha büyük ölçüdeki kıvrılmalarla ve çarpılmalarla sonuçlanacaktır.
- Portland çimentosu betonu modülü- Portland çimentosu betonu modülünün düşüğü çatlama açısından daha iyidir ama daha düşük bir modül çatlama performansı üzerinde zararlı etki gösterebilmektedir.
- Rötre- Düşük rötre tüm derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için daha iyidir.
- Isı genleşme katsayısı- Düşük ısı genleşme katsayısı tüm derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için daha iyidir.

Portland çimentosu betonunun çoğu özellikleri yerel malzemelerce ortaya çıkmaktadır ve tasarımcının dayanıma oranla karışım özellikleri üzerinde daha düşük ölçüde kontrolü söz konusu olabilmektedir. Bununla birlikte, üstyapı performansı için portland çimentosu betonu karışımını optimize etmek mümkündür ve karışım optimizasyonu bazı projeler için pratik olabilmektedir. Bazı portland çimentosu betonu özellikleri üstyapı performansı ile birlikte malzeme maliyetini de etkilemektedir.

8.4.4 Enine Derz Aralığı

Derz aralığı; hem enine çatlaklara hem de derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yapım maliyetine etki eder. Aynı zamanda daha az bir oranda da olsa derz bozulmalarına da etki eder. Saha çalışmaları göstermiştir ki; daha uzun derz aralıkları, enine çatlaklar için daha büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Derz aralığı; plak kalınlığı, plak genişliği, portland çimentosu betonu malzeme özellikleri ve temel tipi gibi tasarım özelliklerinin bağlamı içinde seçilmelidir. Belirlenmiş bir derz aralığı verilmiş olan birtakım tasarım özellikleri için yeterli olabiliyorken diğer birtakım tasarım özellikleri için yeterli olamayabilmektedir. Amaç; istenilen güvenilirlik düzeyinde, tasarım ömrü boyunca kabul edilebilir düzeyde enine çatlamları ve düzgünlüğü ortaya koyabilecek maksimum derz aralığını seçebilmektir. Yukardan-aşağıya çatlama direkt olarak göz önüne alındığında derz aralığı daha da kritik bir hal almaktadır. Kamyon dingil aralığı (özellikle dönüş dingili ile hemen ardından gelen dingil arası), bu dingillerin tümü verilmiş olan bir plağa etki ettiği süreçte, ciddi enine ve diyagonal olarak yukarıdan-aşağıya çatlamlara yol açabilecek olan plağın üstündeki eğilme gerilmelerine oldukça ciddi anlamda etki eder. Genellikle, kısa bir derz aralığı (örneğin; 15 ft (4.5 m)) önerilir. Bununla birlikte şerit genişliği 12 ft (3.6 m) olduğu sürece 12 ft (3.6 m)'ten küçük derz aralığına ihtiyaç duyulmaz.

8.4.5 Enine Derzlerde Yük Transfer Verimliliği

Enine derzler arası yük transferi, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının ve buna bağlı olarak düzgünlüğün kontrolünde en kritik faktördür. Saha çalışmaları göstermiştir ki; mekanik düzeneklerin (bağlantı donatıları) kullanımı ile enine derz bozulma potansiyeli önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Bağlantı donatısı çapı, derzli donatısız tipteki rijit üstyapı bozulmalarına etki eden önemli bir faktördür. Küçük-çaplı bağlantı donatıları (1 in (2.54 cm) veya daha küçük) derz bozulmalarının önlenmesinde nispeten etkisiz kalırken, büyük çaplı (örneğin; 1.5 in (3.8 cm)) bağlantı donatıları oldukça etkilidir. Bitüm veya çimento ile stabilize edilmiş temeller de aynı zamanda derz yük transferini artıran diğer bir faktördür.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğünün kontrolünde; derz bozulmaları en kritik faktördür. Derz bozulmalarına etkin derzli donatısız tipteki rijit

üstyapı tasarım faktörleri; bağlantı donatısı çapı, temel tipi, kenar destekliği (bağlanmış portland çimentosu betonu banket veya genişletilmiş plak) ve plak genişliğini içermektedir. Rötire, ısı genleşme katsayısı ve elastik modülü içeren portland çimentosu betonu karışım özellikleri ve aynı zamanda iklim de derz bozulmalarına etki etmektedir. Bununla birlikte, bağlantı donatısı çapı; enine derz bozulmalarına çok daha baskın şekilde etki eden faktördür. İstenilen güvenilirlik düzeyinde tasarım ömrü boyunca düzgünlüğün ve kabul edilebilir düzeyde derz bozulmalarının garanti edilmesi için yeterli derz yük transfer verimliliği sağlanmalıdır.

8.4.6 Enine Doğrultudaki Derz Kesme Derinliği

Kesme derinliği; uygun enine derz formasyonunun elde edilmesi açısından önem taşır. Rasgele çatlaklardan kaçınmak için uygun şekilde biçimlenmeyi sağlayacak minimum kesme derinliği tercih edilenidir. Enine doğrultudaki derz kesmeleri için genel uygulama plak kalınlığının %25 i ölçüsündeki derinliktir. Bu derinlik birçok durumda iyi sonuçlar vermiştir fakat geçirimli ve stabilize temellerin kullanıldığı yerlerde daha derin derzler göz önünde bulundurulmalıdır. Daha büyük bir efektif plak kalınlığı ile sonuçlanan portland çimentosu betonunun geçirimli bir temele penetrasyonu veya portland çimentosu betonu plakların stabilize temelle baştaki aderansı, uygun derz formunun sağlanması için daha derin derz kesme derinliklerini gerektirir. Bu tür tasarımlar için, plak kalınlığının üçte biri ölçüsündeki derinlikte derz kesimleri önerilir. Çimento ile stabilize edilmiş olan ve gro beton temellerde, potansiyel rasgele çatlamların en aza indirgenmesi için portland çimentosu betonundaki enine derzlerin planlanmış bölgelerinde temelin üçte bir ölçüsünde kertilmesi önerilir.

8.4.7 Boyuna Derzlerin Yük Transfer Etkinliği ve Bağlantıları

Trafik şeritler ile bağlanmış rijit banket arasındaki boyuna derzlerin yük transfer etkinliği eğilme gerilmelerine ve rijit plaktaki defleksiyonlara etki eder. Buna bağlı olarak, boyuna derzlerdeki yük transfer etkinliği enine çatlamlara ve derz bozulmalarına etki eder. Boyuna derz yük transfer etkinliği arttıran bağlantı donatıları ayrıca şerit ayrılmalarını da önler. Üstyapı strüktürü içine sızan su miktarını arttıran şerit ayrılmaları bununla birlikte bir güvenlik problemine de dönüşür.

Yeterli bir bağlantı donatısı sistemi etkili boyuna inşa derzlerinin meydana getirilebilmesinde kritik rol oynar. Çalışmalara göre orta ve yüksek hacimli trafiğin taşındığı çoğu karayolu için 30 in (76.2 cm)'lik aralıklarla yerleştirilmiş No.5 donatısının (30 in (76.2 cm) uzunluklu) yeterli performansı sağlayabildiği saptanmıştır. Ağır kamyon geçişinin sık olduğu yerlerde (örneğin; hızlanma/yavaşlama şeritleri, kamyon tırmanma şeritleri) daha kısa aralıklarla yerleştirilmiş daha büyük çaplı bağlantı donatılarının kullanılması daha uygundur.

8.4.8 Boyuna Derz Kesme Derinliği

Kesme derinliği, boyuna derzlerin uygun formunun sağlanabilmesi açısından önemlidir. Rastgele çatlakları önlemeyi garanti edebilecek minimum kesme derinliği arzu edilir. Genellikle, daha düşük desteklik ve kıvrılam gerilmeleri nedeniyle özellikle şerit banket boyuna derzlerinde uygun derz formunun elde edilebilmesi için enine derzlerdekenden daha derin olan kesmelere ihtiyaç duyulur. Boyuna derzlerin kesme derinliği için plak kalınlığının üçte biri ölçüsündeki değer önerilir.

8.4.9 Temel

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların altında kullanılabilecek; yoğun gradasonlu agrega temel (stabilize edilmemiş), çimento ile iyileştirilmiş temel, bitüm ile iyileştirilmiş temel, düşük dozajlı beton (grobeton) temel, yeniden işlenip kullanılabilir hale getirilmiş portland çimentosu betonundan temel ve geçirimli temel tiplerini içeren birçok temel tipi mevcuttur. Derz bozulmaları, düzgünlük ve plak çatlakları üzerinde temel tipinin etkileri gözlenmiştir. Temel eğer plağa bağlanmış ise bir ijit stabilize zeminin yapısal katkısı oldukça kayda değerdir. Buna karşın, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bir temel tabakasının sağlanmasının temel amacı bölgesel başarısızlıkların ve bozulmaların önlenmesinde kritik olan uniform destekliğin ve aşınma direncinin sağlanabilmesidir. Yapısal kapasite için, diğer birçok tasarım faktörünün (örneğin; plak kalınlığı, portland çimentosu betonu dayanımı ve kenar destekliği) stabilize bir temele göre daha direkt ve daha büyük etkisi vardır. Diğer yandan, ilave yapısal kapasite, bir temel tabakası ile sağlanan fonksiyonların yerini alamaz.

Stabilize zeminli derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmaları önemli derecede daha azdır; ancak çimento ile işlenmiş ve düşük dozajlı beton temeller için yansıma çatlakları bir problem oluşturmaktadır. Geçmişte, çimento ile işlenmiş ve

düşük dozajlı beton temellerin plaktan ayrılması için çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte, üstyapı tabakaları arasındaki kompozit hareket genelde yararlıdır. Çimento ile işlenmiş ve düşük dozajlı beton temeller, rijit plakta yapılması planlanan derz bölgelerinde çentilebilir (plak kalınlığının 1/3'ü) ve yansıma çatlaklarının çözümünde daha pozitif bir anlamda plağa bağlanabilir ve aynı zamanda temel ile plak arasındaki bağlantının yararları gerçekleştirilebilir. Çentilmiş ve bağlanmış zemin aynı zamanda derzlerdeki uniform çatlamayı da iyice sağlar. Bununla birlikte, temel ile plak arasındaki bağlantı 4 yıldan daha uzun süreli hesaba alınamaz.

Temel tipi; saha koşulları (iklim ve taban zemini dahil), trafik düzeyi, diğer üstyapı tasarım özellikleri ve maliyet etmenleri dikkate alınarak seçilmelidir. Yüksek hacimdeki ağır taşıtlara tabi olan üstyapılar için, özellikle yağışlı ve yağışlı-don görülen bölgelerde uniform ve aşınmaya karşı dirençli bir temel oldukça önem taşır. Temelin aşınabilirliği üzerinde stabilize edici miktarının kayda değer etkisi vardır. Bundan dolayı, stabilize edici miktarının; tasarım ömrü, iklim ve diğer tasarım koşullarına uygun olarak seçilmesi gerekir.

8.4.10 Alttemel

Temel tabakasının altında bir alttemel tabakasının kullanımı; taban zeminin tipi ve rijitliği, temel tabakasının tipi (işlenmemiş veya stabilize edilmiş temel) ve açık gradasyonlu drenaj tabakasının kullanımını içeren birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir. Stabilize bir temel üzerine inşa edilen derzli donatısız tipetki rijit üstyapılar için yapılan saha çalışmaları, stabilize temel tabakası altında erozyonun yer alabileceğini göstermiştir. Birçok ajans stabilize temel altında kullanılabilecek bir granüler tabaka belirlemiştir. Bir agrega alttemel, ayrıca; çok yumuşak, ince taneli taban zemini üzerindeki agrega temelin ince tanelerle kirlenmesine karşı korunmasının bir ölçütü olarak da kullanılabilir. Geçirimli bir temel tabakasının altında, yoğun gradasyonlu bir alttemel tabakasının kullanımı, açık gradasyonlu drenaj tabakasının içine ince malzemelerin süzülmesini önlemek için gerekli olan bir filtre tabakası için gradasyon gerekliliklerini karşılar.

8.4.11 Yüzey-altı Drenaj

Mevcut teknik gelişmelerdeki son duruma göre; üstyapılarda yüzey-altı drenaj verimliliği veya yüzey-altı drenaj gerekliliği ile ilgili şüpheleri ortadan kaldıracak bir görüş bulunmamaktadır. Yüzey-altı drenajın verimliliği; inşa problemleri (örneğin;

kenar drenlerine verilen hasarlar, geçirimli temelin kirlenmesi), yetersiz bakım ve geçirimli temel için kullanılan bazı malzemelerin zayıf stabilitesi ile birlikte iyice karmaşık hale gelmiştir. İyi yüzey-altı drenajı sağlanamadığında; temel, alttemel, banket ve kayma donatılı enine derzlerin ve genişletilmiş plakların kullanımı gibi özelliklerin kullanımı içeren bazı tasarım özelliklerinin kombinasyonu ile pompaj ve erozyonun üstesinden gelinmelidir. Bu tasarım özellikleri ile ilgili deneyimler derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yüzey-altı drenaj olmadan da yeterli fonksiyonel ve yapısal performansın sağlanabileceğini göstermiştir. Buna karşı, iyi bir yüzey-altı drenaj sistemi, uzun-ömürlü iyi malzeme performansına elde edilebilmesi için çok önemli olabilmektedir. İyi tasarlanmış, yapılmış ve bakımı yapılmış olan yüzey-altı drenaj sistemine sahip üstyapı kesimlerinde rijit üstyapı performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Rijit üstyapılarda, özellikle yağışlı-don görülen bölgelerde, beklenenden önce ortaya çıkan bozulmaların başlıca sebebi D-çatlamalarıdır. Yapılan çalışmalar; D-çatlamalarının ve portland çimentosu betonu malzemesi ile ilgili diğer problemlerin hafifletilmesinde yüzey-altı drenajın önemli olduğunu göstermiştir. Uzun-ömürlü malzeme performansı daha uzun tasarım periyodları için daha kritiktir ve yüzey-altı drenaj malzeme performansını arttırabilecek kayda değer bir belirleyici tasarım niteliğidir.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için; uzatılmış geçirimli temel, kenar drenleri ve geçirimli temelleri içeren çeşitli yüzey-altı drenaj seçenekleri mevcuttur. Sadece banketin altında geçirimli bir temelin sağlandığı, “Geçirimli banket” olarak adlandırılan bir tasarım da aynı zamanda rijit üstyapılar için yüzey-altı drenaj için etkili bir çözüm olarak sunulmuştur. Yüzey-altı drenaj sistemleri yalnızca bakımının garanti edileceği üstyapılarda kullanılmalıdır. Daha detaylı bilgi için kılavuzda; 3. BÖLÜM, Kısım 1’de yüzey-altı drenajla ilişkili parametreler sunulmuştur.

8.4.12 Banket Tasarımı

Banket tasarımı, yapı maliyetini ve üstyapı performansını etkilemektedir. Banket tipi ve genişliğinin seçiminde dikkate alınan unsurlar, yol kaplamalarının onarımı ve acil kullanımlar sırasında servis trafiği için gerekli banket kullanımını da içermektedir. Banket, trafiğin yoğun olduğu saatlerde fazladan bir şerit olarak kullanılmak üzere de tasarlanabilir. Yekpare olarak inşa edilmiş bağlı rijit banket,

derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yapısal kapasitesini arttırmada oldukça etkilidir. Rijit şerit-rijit şerit- bağlı rijit banket formu ile derzler daha etkili bir şekilde doldurulabilir ve derzlerdeki defleksiyonlar azaltılabilir. Aynı zamanda, buna bağlı olarak potansiyel pompaj etkisi ve erozyon riski azaltılmış olunur.

8.4.13 Taban-Zeminin İyileştirilmesi

Yumuşak taban-zeminin yüzeyinde yapılan iyileştirme, kaplamaya daha büyük bir destek ve uyumluluk kazandırmakta ve yapıya yardımcı olmaktadır. Taban-zeminin kalitesi, güçlü bir üst katman veya kalın granüler tabaka ile sağlanabilir. Taban zeminin iyileştirilmesinin etkileri; tasarım prosedüründe plak defleksiyon ve gerilmelerini etkileyen artan modül olarak gözönünde tutulur. İyileştirilmiş taban zeminin diğer bir faydası, taban zemininde oluşabilecek potansiyel bir aşınmanın azaltılabilmesidir. Taban zeminin geliştirilmesi, daha düzgün bir üstyapının inşasında da önemli bir rol oynayabilir. Kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 1, taban tesviyesinin iyileştirilme tekniklerini daha ayrıntılı olarak tartışmaktadır.

8.5 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapıların (Jointed Plain Concrete Pavement) Tasarım Prosedürü

Bu kısım, aşırı gerilmeler sonucu oluşan bozulmaların önceden tahmini ve en son tasarımın seçimi için yapılan hesaplamaları adım adım sunmaktadır.. Daha önce belirtildiği gibi, bu Klavuza göre üstyapı tasarımı, yinelemeli bir süreçtir. Tasarımcı, öncelikle bir performans ölçütü belirlemeli ve tasarım hedeflerine uygun özellikleri taşıyan bir taslak seçmelidir. Daha sonra bu taslak tasarım, performansı açısından analiz edilir. Performans ölçütü arzu edilen güvenilirlik düzeyini karşılamıyorsa, seçilen her bir performans ölçütü, istenen tatmini sağlayana dek değiştirilir. Bu bölümde açıklanan prosedürler, her performans göstergesinin çeşitli girdi parametrelerine olan duyarlılığı ve deneme tasarımının amaçlarını karşılamak için modifiye edilmesi yaklaşımıyla tanımlanmıştır..

8.5.1 Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapıların Performans Kriteri

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı; enine çatlamlar, bozulma ve düzgünlük gibi üç performans ölçümüne dayalıdır. Tasarımcı, bu üç performans ölçütünden bazılarını ya da hepsini seçebilir. Seçilen her bir performans ölçümü için, tasarımcı,

tasarım ömrü sonundaki (örneğin; çatlamış plak yüzdesi, bozulma miktarı ve IRI) arzu edilen güvenilirlik düzeyini seçmiş olmalıdır. Hem performans düzeyi hem de tasarım güvenilirliği, yolun fonksiyonel sınıfı dikkate alınarak belirlenmelidir. Performans ölçütü konusunda bu bölümün 8.3.3 kısmına bakabilirsiniz. Kılavuzda; BÖLÜM 1, Kısım 1’de, fonksiyonel sınıfına dayalı tasarım güvenilirlik düzeyi konusunda birtakım genel öneriler sunulmaktadır fakat söz konusu sınıflandırma, bu Rehberi kullanan karayolları kurumları tarafından değerlendirilip, düzenlenmelidir.

8.5.2 Deneme Tasarımı

Deneme tasarımı, bu bölümün 8.4’üncü bölümünde açıklanan unsurlar dikkate alınarak seçilmelidir. Farklı tasarım koşulları nedeniyle üstyapı tasarımları konusunda edinilen yerel deneyim, deneme tasarımının seçiminde en değerli kaynaklardan biri olabilir. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) Projesi 1-32 (19) adı altında geliştirilen tasarım katalogu da deneme tasarımının seçiminde yardımcı olabilir. Tipik bir deneme tasarımı bölümü aşağıdaki özellikleri içerir:

- Portland çimentosu betonunun dayanımı – tipik tasarım dayanıklılığı. Bu tasarım girdisinin, istenen minimum dayanım değil, beklenen ortalama dayanım olduğuna dikkat edinilmelidir.
- Deneme plak kalınlığı – trafik yoğunluk düzeyi, portland çimentosu betonu özellikleri ve iklime dayalıdır. Kenar desteklerinden (bağlı rijit banket veya genişletilmiş plak) bağımsız derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için önerilen ilk deneme kalınlıkları:
 - Düşük yoğunluklu trafik (2-yönlü günlük ortalama trafik (ADTT < 1000) – 8 inç veya daha az.
 - Orta yoğunlukta trafik (2-yönlü ADTT, 3000’e kadar) – 9 ila 10 inç.
 - Yoğun trafik (2-yönlü ADTT > 3000) – 10 inç veya üstü.

Yağışlı veya yağışlı-don görülen alanlarla karşılaştırıldığında, kurak-don görülmeyen bölgelerde daha kalın plak kullanımına gerek duyulmaktadır. Deneme kalınlığı, kenar destekli derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için 1 inç azaltılabilir.

- Derz açıklığı – aşırı büyüklükteki derz açıklığının bırakılması, genelde, tavsiye edilmemektedir. Tipik bir trafik akışı için, 15 ft (4.5 m)'lik bir açıklık oldukça iyi iş görebilir. Rehber değerler için, 8.3.7 ve 8.4.4 kısımlara bakılabilir.
- Temel ve alt-temel – Parametreler için 8.4.9 ve 8.4.10'daki kısımlara bakınız.
- Kenar destekliği – yekpare olarak inşa edilmiş bağlı rijit banket ve genişletilmiş plak tasarımları, kritik defleksiyonları ve gerilmeleri azaltmada etkilidir. Parametreler için 8.4.12 kısmına bakınız.

8.5.3 Performans Tahmini – Enine Çatlama

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamlar için, hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya çatlama şekilleri dikkate alınmaktadır. Tipik hizmet koşulları altında her bir potansiyel çatlama şekli tüm plaklarda mevcuttur. Verilen bir plak aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya doğru çatlayabilir, ama her iki yönden çatlamaz. Bu nedenle, aşağıdan yukarıya yada yukarıdan aşağıya tahmin edilen çatlama, kendi içinde bir anlam ifade etmese de aynı plak üzerinde her iki şekilde oluşabilecek çatlama olasılığı dışarıda bırakıldığında kombine çatlama daha rahat elde edilir.

Çatlama Modeli

Verilen bir trafik şeridinde enine çatlaklı plakların yüzdesi enine çatlama ölçümü olarak kullanılmakta ve şu formülle hem aşağıdan yukarıya hem de yukarıdan aşağıya çatlama modeli kullanılarak tahmin edilir:

$$CRK = \frac{1}{1 + FD^{-1.68}} \quad (8.2)$$

CRK = aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya öngörülen çatlama miktarı.

FD = bu kısımda açıklanan işlemlerin kullanımıyla hesaplanan yorulma hasarı.

Model İstatistikleri:

$$R^2 = 0.68$$

$$N = 521 \text{ gözlem}$$

$$SEE = \text{yüzde } 5.4$$

Toplam çatlak miktarı, aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$TCRACK = (CRK_{bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up} * CRK_{Top-down}) * \%100 \quad (8.3)$$

TCRACK = (yüzde) toplam çatlama.

CRK_{Bottom-up} = aşağıdan yukarıya öngörülen çatlama miktarı.

CRK_{Top-down} = yukarıdan aşağıya öngörülen çatlama miktarı.

8.3 denklemi, bir beton kalıbın her iki yönden birden değil ama ya aşağıdan yukarıya ya da yukarıdan aşağıya çatlayabileceğini öngörmektedir.

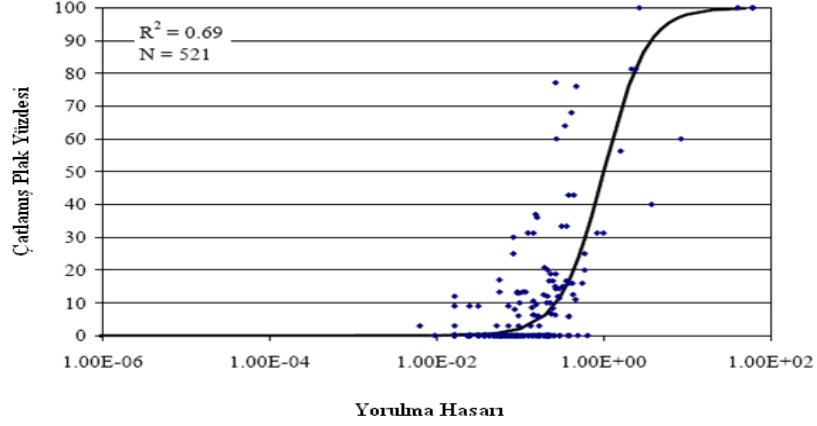
Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlama modeli, 24 Eyalet'te yer alan 196 sahada belirlenen alan performansına dayalı olarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon bölümleri, LTPP GPS-3 ve SPS-2 kısımları ve de FHWA'nın *Rijit Üstyapıların Performansı* çalışmasından alınmış 36 kısımdan oluşmaktadır. Zaman serisi verileri, toplam 522 çatlak gözleminden oluşan pek çok kısım için mevcuttur. 8.2 denkleminde verilen çatlama tahminleri, şekil 8.20'de gösterilmektedir. Şekil 8.21, örnek bir olay olarak, yıllara göre tahminlenen çatlamayı göstermektedir. Bu tahminler, yorulma hasarının bu kısımda açıklanan işlemlere göre hesaplanması durumunda geçerlidir.

Yapısal Tepki Modeli

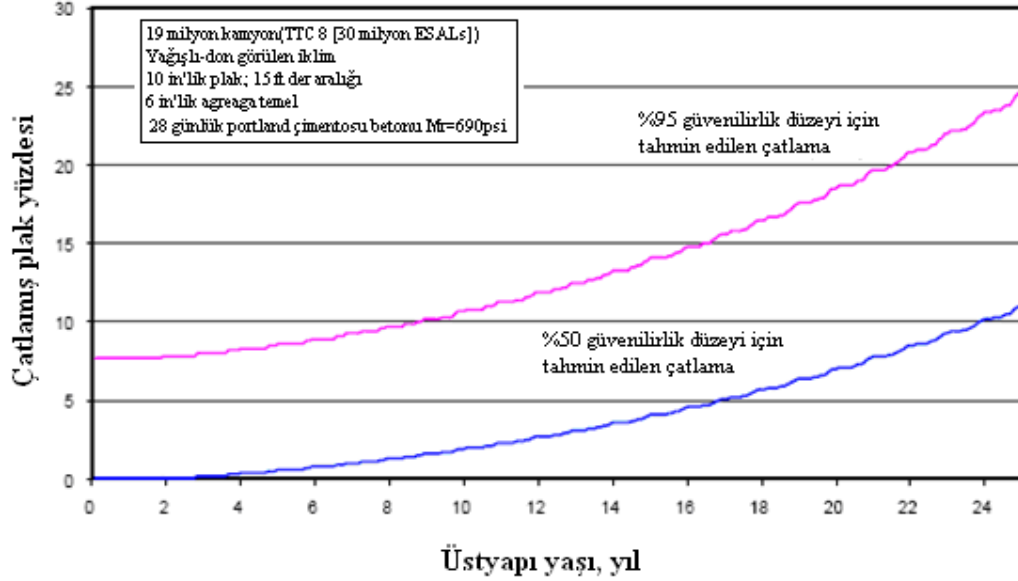
Aşağıdaki faktörler, portland çimentosu betonu plağındaki eğilme gerilmesinin büyüklüğünü etkilemektedir:

- Plak kalınlığı.
- Portland çimentosu betonu elastik modülü.
- Portland çimentosu betonu Poisson oranı.
- Portland çimentosu betonu birim ağırlığı.
- Portland çimentosu betonu ısı genleşme ve rötre katsayısı.
- Temel kalınlığı.
- Temel elastisite modülü.
- Temel birim ağırlığı (bağlanmış portland çimentosu betonu plak ile temel arasındaki ara yüzeyi için).

- Portland çimentosu betonundan plak ile temel arasındaki ara-yüzey koşulları.
- Derz aralığı.
- Taban-zemininin rijitliği.
- Şerit-banket arası yük transfer etkinliği



Şekil 8.20: Saha verileriyle gösterilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların çatlama modeli [15]



Şekil 8.21: Çatlama modeli ile verilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların örnek çatlama tahminleri [15]

- Boyuna derzlerde şeritler arası yük transfer etkinliği (genişletilmiş plaklı üstyapılar için).
- Plak kalınlığı boyunca ısı dağılımı.

- Plak kalınlığı boyunca nem dağılımı.
- Etkin kalıcı kıvrılma/çarpılma büyüklüğü.
- Yükleme düzeni
 - Aşağıdan yukarıya çatlama için tekli, ikili, üçlü ve dördü akşlar.
 - Yukarıdan aşağıya çatlama için kısa, orta ve uzun aks açıklığı.
- Dingil ağırlığı
- Tekerlek lastik basıncı ve dingil görünüş oranı

Yukarıdaki parametrelerin birçoğu (örneğin; plak kalınlığı ve derz aralığı) tasarım periyodu boyunca sabit kalırken, diğerleri iklimsel, aylık, saatlik olarak ve üstyapı yaşına göre değişim gösterir. Kesin yorulma analizi sonuçları için, kaydadeğer gerilme farklılıklarını doğabilecek bütün olasılıkların ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir. Bu kılavuzdaki yorulma hasarı artımları şu durumların elde edilmesi için tanımlanmıştır:

- Üstyapı yaşı- portland çimentosu betonunun modülü ile dayanımın yaşıyla olan değişimi ve stabilize bir temel ile rijit plak ara-yüzeyindeki aderans koşullarındaki değişimi için yapılan hesaplamalar.
- Ay- temel rijitliği, alt-temel rijitliği (efektif k-değeri içinde birleştirilmiş alt-temel tabakaları üzerindeki nem ve sıcaklık etkilerini içeren) ve diferansiyel rötreten kaynaklanan plak çarpılması üzerindeki aylık bağıl nem değişimlerinin etkisi için yapılan hesaplamalar.
- Yükleme düzeni:
 - Tabandan tavana çatlak için tekli, ikili, üçlü ve dördü akşlar.
 - Yukarıdan aşağıya çatlak için kısa, orta ve uzun aks açıklığı.
- Yükleme düzeyi
 - Tekli akşlar — 1000 pound'luk aralıklarla 3000 ile 41000 pound.
 - İkili akşlar — 2000 pound'luk aralıklarla 6000 ile 82000 pound.
 - Üçlü akşlar — 3000 pound'luk aralıklarla 12000 ile 102000 pound.
 - Dördü akşlar — 3000 pound'luk aralıklarla 12000 ile 102000 pound.

Yukarıdan aşağıya çatlama için tekil-tandem dingil kombinasyonu, tekil dingil yükü için sabit 12000 pound'luk yükleme öngörmektedir. Tekil-tandem kombinasyonunun tandem dingil yük düzeylerinin standart tandemlerle aynı olduğu öngörülmektedir.

- Sıcaklık — (doğrusal olmayan sıcaklık dağılımını da içeren) gerçek sıcaklık gradientinin etkileri, kalıcı kıvrılma/çarpılma ve efektif sıcaklık farklılığı olarak tanımlanan çarpılmadaki aylık değişim.
- Yükleme pozisyonu — altı spesifik yükleme yerine göre kritik hasar bölgesindeki hasarın hesaplanmasında trafik geziniminin etkileri için geliştirilen hesaplama prosedürü aşağıdaki gibidir:
 - Aşağıdan yukarıya çatlama — üstyapı ayırından 0.5555, 2.640, 5.360, 7.445, 10.536 ve 17.464 inç mesafede yerleştirilen dingil yükleri. Herbir yatay kaydırma için maksimum gerilmeyi doğurmak için dingil boyuna doğrultuda plağın merkezine yerleştirilir.
 - Yukarıdan aşağıya çatlama — üstyapı ayırından 1.666, 7.920, 16.080, 22.334, 27.381 ve 36.619 inç mesafede yerleştirilen dingil yükleri. Herbir yanal kaydırmada maksimum maksimum gerilmeleri ortaya çıkarmak için; boyuna doğrultuda, tandem bir dingili (ön veya arka) plak bitimindeki enine derze yakın olarak ve tekil dingil plağın karşı bitimindeki enine derze yakın olarak (şekil 8.6 'da dövrüldüğü gibi) yerleştirilir. Yukarıdan aşağıya maksimum gerilim için öngörülen yükleme pozisyonu, rijit plakanın boyutuna ve dingil açıklığına bağlıdır.

Yukarıdaki kombinasyonlar, her tasarım yılı için, gerilmelerin tek tek hesaplanmasının gerektiği, yaklaşık 1 milyon adet farklı durum ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte; gerçek gerilme sonuçlarını ortaya koyabilecek bir yapısal modelin (örneğin; bir sonlu eleman analiz programı) kullanılarak analiz edilmesinin gerekli olduğu durumların gerçek sayısını büyük oranda azaltabilecek enterpolasyon tekniklerinin kullanılması mümkündür. Örneğin, yalnızca tekil dingil için yükleme artışları 40 ayrı durumu ortaya çıkarmaktadır. Diğer yandan, sınırlı sayıdaki durumlar için (örneğin, 3000 lb-1.4 ton, 12000 lb-5.6 ton, 21000 lb-9.6 ton, 30000 lb-14 ton ve 40000 lb-18 ton) farklı yükleme seviyelerindeki gerilmeler, enterpolasyon kullanılarak doğru bir şekilde elde edilebilir. Bu gibi teknikler tüm parametrelere uygulandıklarında, karmaşık yapısal model kullanarak analiz edilmesi

gerekli olan durum sayısı, her tasarım yılı için (25 tasarım yılı için yaklaşık 500000 proje) yaklaşık 20000 proje'ye düşürülebilir.

Gerilmeleri belirlemede kullanılan yapısal model, aşağıda verilenleri dikkate alarak, gerilimi doğru olarak hesaplayabilmelidir:

- Sıcaklık ve dingil yükleri – modelin rijit plak boyunca lineer olmayan sıcaklık dağılımının ve çoklu tekerlek yüklemelerinin üstesinden gelebilecek yeterlilikte olması gerekir.
- Rijit plağın kıvrılması sonucu oluşan desteklik kaybı (rijit plağın temelden ayrılması).
- Temel tabakasının etkileri – modelin, bağlanmış ve bağlanmamış durumları dikkate alması gerekir.
- Çoklu plak sisteminde, yan yana gelen rijit plakların birbiri ile etkileşimi ve hem enine hem de boyuna tüm derzlerdeki yük transferi.

Genel olarak, bir sonlu element analiz programı gerekmektedir. Tasarım Rehberi programındaki gerilme hesaplamaları, büyük sayıdaki sonlu eleman analizleriyle dayalı olarak çalışan ISLAB2000 kullanılarak nöral (sinirsel) ağlarına dayalı olarak yapılmaktadır. Nöral ağda kapsanan girdi parametrelerinin istatistik dağılımı, aşağıdan yukarı gerilmeler için tablo 8.3'de ve yukarıdan aşağıya gerilmeler için tablo 8.4'de gösterilmektedir. Bu dağılım alanı, her bir parametre için uygulanabilir limitleri temsil etmektedir. Tablo 8.3 ve 8.4'de listelenen rölatif rijitlik yarıçapı, temel ile ilgili rijit plağın bağıl rijitliğini temsil eden bileşik bir parametre olup, aşağıdaki denklemde verilmektedir:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC} h_e^3}{12(1 - \mu_{PCC}^2)k}} \quad (8.4)$$

E_{PCC} = Portland çimentosu betonunun elastik modülü, psi.

h_e = efektif beton plak kalınlığı, inç.

μ_{PCC} = Portland çimentosu betonu poisson oranı

k = taban zemini tepkisinin (k-değeri) dinamik modülü, psi/inç.

Tablo 8.3: Rijit plağın tabanındaki kritik gerilim hesaplamasında kullanılan nöral ağ girdi parametrelerinin dağılım alanı [15]

Girdi Parametresi	Minimum Değer	Maksimum Değer
Rölatif rijitlik yarıçapı ^a	22.5 in	80 in
Derz aralığı	12 ft	30 ft ^b
Enine derzlerin yük transfer etkinliği	0%	95%
Banketlerin yük transfer etkinliği	0%	90%
Plak kenarına olan dingil mesafesi	0 in	36 in
Dingil görünüş oranı (enden-boya)	10	0.5
Sıcaklık farklığı (tavan-taban)	0 °F	> 40 °F ^c
Dingil ağırlığı, tekil dingil	0 lb	45,000 lb
Dingil ağırlığı, tandem dingil	0 lb	90,000 lb
Dingil ağırlığı, üçlü dingil	0 lb	135,000 lb
Dingil ağırlığı, dörtlü dingil	0 lb	135,000 lb
Tandem ve üçlü dingil aralığı	40 in	70 in

- ^a Karayolları üstyapıları için rölatif rijitlik yarıçapı genellikle 22.5-80 in arasındadır. Rölatif rijitlik yarıçapı için, plak toerisine dayanan bu değerler yukarıdaki limitleri aştığında oldukça hatalı sonuçlar vermeye başlar.
- ^b Tipik karayolları için aşağıdan yukarıya gerilmeler derz aralığı 30 ft'den az olduğunda maksimum değere ulaşır. 30 ft'lik plaklar için verilmiş sonuçlar gerçek derz aralığı 30 ft'den büyük olan derz aralıkları içindir. Kıvrımlı gerilmelerinden dolayı, genellikle, uzun derz aralıkları (20 ft veya daha büyük) önerilmektedir.
- ^c Portland çimentosu betonunun genleşme katsayısına, k-değerine, portland çimentosu betonu birim ağırlığına, portland çimentosu betonu kalınlığına ve rölatif rijit yarıçapına göre değişir

Tablo 8.4: Rijit plağın üstünde kritik gerilim hesaplamasında kullanılan nöral ağ girdi parametrelerinin dağılım alanı [15]

Girdi Parametresi	Minimum Değer	Maksimum Değer
Rölatif rijitlik yarıçapı	22.5 in	80 in
Derz aralığı	12 ft	20 ft ^b
Enine derzlerin yük transfer etkinliği	kayma donatısız ise %50 kayma donatılı ise %85	
Banketlerin yük transfer etkinliği	0%	90%
Dingilin plak kenarına mesafesi	0 in	36 in
Dingil görünüş oranı (eninden-boyuna)	10	0.5
Sıcaklık farklığı (tavan-taban)	0 °F	< -80 °F ^c
Dingil açıklığı	12 ft	20 ft
Dingil ağırlığı, tekil dingil	12,000 lb-sabit	
Dingil ağırlığı, tandem dingil	0 lb	135,000 lb
Tandem dingil açıklığı	40 in	70 in

- ^a Karayolları üstyapıları için rölatif rijitlik yarıçapı genellikle 22.5-80 in arasındadır. Rölatif rijitlik yarıçapı için, plak toerisine dayanan bu değerler yukarıdaki limitleri aştığında oldukça hatalı sonuçlar vermeye başlar.
- ^b Tipik karayolları için yukarıdan-aşağıya gerilmeler derz aralığı 20 ft olduğunda maksimum değerine yaklaşır. 20 ft'lik plaklar için verilmiş sonuçlar gerçek derz aralığı 20 ft'den büyük olan derz aralıkları içindir. Aşırı kıvrımlı gerilmelerinden dolayı, genellikle, uzun derz aralıkları (20 ft veya daha uzun) derz aralıkları önerilmemektedir.
- ^c Portland çimentosu betonunun genleşme katsayısına, k-değerine, portland çimentosu betonu birim ağırlığına, portland çimentosu betonu kalınlığına ve rölatif rijit yarıçapına göre değişir

Catlama Tahmin Prosedürü

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kalibre edilmiş enine çatlak tahmin modeli, yorulma hasarının, sadece, bu kısımda ana hatları ile belirlenen işlemler izlenerek hesaplanması durumunda geçerlidir. Bu kısımda sunulan, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamayı tahmin etmek üzere izlenecek adım adım işlem sürecidir.

İlgili adımlar aşağıdakileri içermektedir:

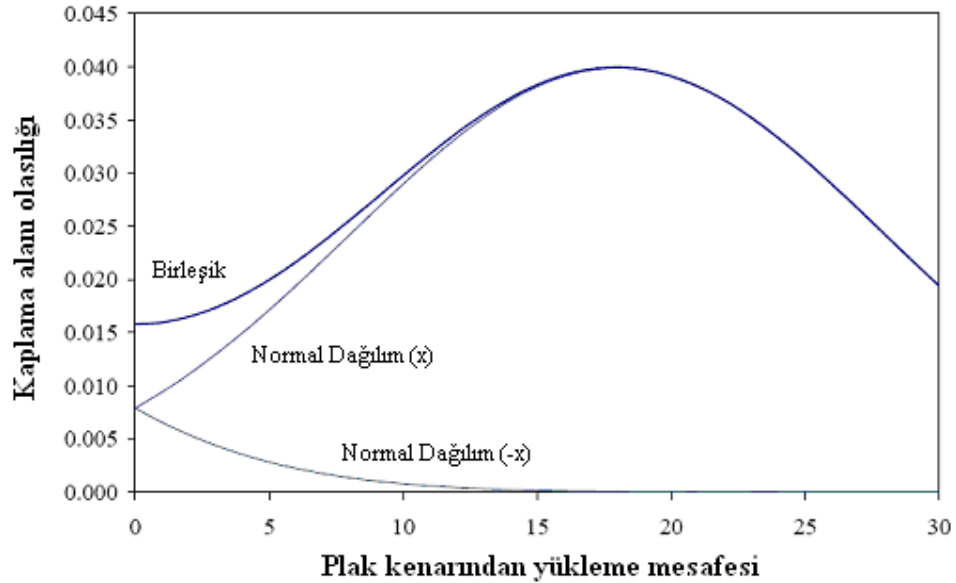
1. Girdi verilerinin tablolaştırılması – derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlamanın tahmin edilmesinde gerekli tüm girdilerin özetlenmesi.
2. Trafik veri prosesi – tekil, tandem, üçlü ve dörtlü dingillerin her geçişinde üretilen tekil, tandem, üçlü ve dörtlü aksların eşdeğer sayısını belirlemek için prosese sokulan trafik verilerinin ayrıca işlenmesi gerekir..
3. Üstyapı sıcaklık verilerinin prosesi – EICM (doğrusal olamayan dağılım) kullanılarak oluşturulan saatlik sıcaklık profillerinin, takvimsel aya göre eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılıklarının dağılımına dönüştürülmesi gerekir.
4. Aylık bağıl nem verilerinin prosesi – iklimsel değişimlerin nem koşulları üzerindeki etkisi; efektif sıcaklık farklılığı olarak tanımlanan plak kıvrılmalarındaki aylık sapmalar olarak dikkate alınır.
5. Gerilmelerin hesaplanması – tasarım periyodu içinde, her ay için her yükleme biçimine (tabandan tavana çatlamlar için dingil tipi ve yukarıdan aşağıya çatlamlar için dingil aralığı), yükleme düzeyine, yükleme pozisyonuna ve sıcaklık farkına karşılık gelen gerilmenin hesaplanması.
6. Yorulma hasarının hesaplanması – her hasar artışı için hasar hesaplamasının yapılması, tabandan tavana ve yukarıdan aşağıya oluşan toplam hasarı belirlemek için toplanması.
7. 8.2 ve 8.3 denklemlerini kullanarak plak çatlak miktarının belirlenmesi.

Varsayımlar

Aşağıdakiler yorulma analizlerinde öngörülmüştür:

- Doğrusal hasar birikimi – prosedür Miner'in hipotezine dayanmaktadır.

- Üstyapı strüktürü, rijit plaka ve bağlı ya da bağımsız ara yüzeyli temelden oluşan iki tabakalı bir sistem olarak modellenmiştir. Alt-temel tabakalarının yanında temel tabakasının kesme dağılımı, taban zemini reaksiyonunun dinamik modül etkisinin kullanımı için hesaplanır.
- Trafiğin yanal gezinimi, ortalama araç tekerlek izi ve standart sapmasını kullanan bir normal dağılımıla modellenmektedir.
- Tekerlek kısmen üstyapı sınırı üzerinde iken, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların sınırındaki gerilmeler kayda değer olmayan düzeye aniden düşmez. Üstyapı sınırından x inç kadar dışta olan tekerlek etkisinin, üstyapı sınırından x inç kadar içte olan tekerlek etkisine eşit olduğu varsayılmaktadır. Böylece, banket ayrıtının x - ve x + inç'lik kısmında konumlanan trafiğin olasılığı, şekil 8.22'de gösterildiği gibi, hasar hesaplamasında beraberce eklenir.



Şekil 8.22: Kısımlen üstyapı dışına çıkan dingil yükünün etkilerini içeren trafik olasılığının grafiksel gösterimi [15]

- Genişletilmiş plak tasarımının kullanımının, şerit-banket sınırından boyuna derz-şerit sınırına kadarki yorulma hasarı için kritik hasar bölgesini değiştireceği varsayılmaktadır. Bu yüzden, genişletilmiş plakların etkileri (yorulma hasarı anlamında); ortalama tekerlek yolunun kritik sınırdan uzakta olması durumu ile sağlanan kritik yükleme sayılarını etkili şekilde azaltma yararının dışında bağlanmış rijit benketlerle benzerdir. Ortalama tekerlek

yolu, şerit-banket sınırındaki boyalı şerit çizgisinden tekerleğin dış kenarına kadar ölçülürse, genişletilmiş plak tasarımı için hesaplanan ortalama etkili tekerlek yolu aşağıdaki gibidir:

$$x^* = LW - AW - x \quad (8.5)$$

x^* = ortalama efektif tekerlek yolu, inç.

LW = şerit genişliği, inç. Tipik şerit genişliği 12 ft (3.6 m) (144 inç).

AW = dıştan dışa ölçülen dingil genişliği, inç. Ortalama dingil genişliği 8.5 ft-2.6 m (102 inç).

x = şerit çizgisinden lastiğin dış alnına kadar ölçülen ortalama tekerlek yolu, inç.

Örneğin, genişletilmiş plak için ortalama tekerlek yolu 18 inç ise (boyalı şeritten, boyalı şerite en yakın olan tekerleğin dış yüzüne kadarki mesafe) ve aks genişliği 8.5 ft-2.6 m (102 inç) ise, ortalama etkili tekerlek yolu 24 inç (60 cm)'dir.

- Temel Poisson oranı, portland çimentosu betonu Poisson oranına eşittir.
- Temel ısı genleşme katsayısı, portland çimentosu betonunun ısı genleşme katsayısına eşittir.
- Temel tabakasındaki sıcaklık dağılımı sabittir.

1. Adım: Girdi verilerinin tablolştırılması

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama tahminleri için gerekli tüm girdilerin tablolştırılması. Gerekli parametreler Tablo 8.5'de özetlenmiştir. Bu tabloda listelenen girdilere ek olarak, aşağıdaki 2, 3 ve 4'üncü adımlardan elde edilen işlenmiş girdiler derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yorulma analizleri için gereklidir.

Tablo 8.5: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlakların önceden tahmin edilmesi için gerekli girdi parametrelerinin özeti. [15]

Girdi	Varyasyon *	Kaynak
Tasarım ömrü (yıl)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Projenin açılış ayı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Açılıştaki PCC yaşı (ay)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Her ay için PCC dayanımı (psi)	Tasarım Ayı ¹	PCC dayanım girdi prosesinin sonucu
Her ay için PCC modülü (psi)	Tasarım Ayı ¹	
Derz aralığı (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Kayma donatısı yarıçapı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aderans yaşı kaybı (ay)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Şerit-banket defleksiyonu yük LTE (%)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Genişletilmiş plak (evet/hayır)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Poisson oranı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
PCC birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Termal genleşme katsayısı (/°F)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Maksimum elastik rötre birim deformasyonu (10^{-6})	Sabit	Direkt tasarım girdisi veya PCC karışım özelliklerine dayanan hesaplamalar
Max rötre için %50'si için geçen süre (gün)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Temel kalınlığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Temel birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aylık temel modülü (psi)	Takvim Ayı ²	İklimsel Analiz Sonuçları
Aylık efektif dinamik taban zemini k-değeri (psi/in)	Takvim Ayı ²	"E'nin k'ya" çevriminin sonucu
Kalıcı kıvrılma/çarpılma (°F)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Dıştan-dışa dingil genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Şerit genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Ortalama tekerlek yolu (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Trafik gezinim standart sapması (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Plak genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Tekerlek basıncı (psi)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Dingil aralığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Çifte tekerlek aralığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Tekerlek genişliği (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Dingil açıklığı- kısa,orta ve uzun (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Her dingil açıklığı için kamyon yüzdesi (%)	Sabit	Direkt tasarım girdisi

¹ Tasarım Ayı: Üstyapı yaşına göre değişen parametreler; ² Takvim Ayı: İklimsel olarak değişen parametreler
PCC: portland çimentosu betonu

2. Adım: Trafik verilerinin prosesi

Trafik verileri, öncelikle, tasarım dönemi içindeki her ay, beklenen tekil, tandem, üçlü ve dördü aks sayısının belirlenmesinde kullanılır. Bu prosedür, kılavuzda; 2. BÖLÜM, 4. Kısımda detaylı olarak açıklanmaktadır. Tabandan tavana hasar için, bir dingilin her geçişi, bir veya daha fazla kritik yüklemenin oluşmasına neden olabilir. Bir dingilin her geçişi, Şekil 8.23'de gösterildiği gibi, farklı aks tipleri için,

tabandan tavana hasar hesaplamasında eşdeğer tekil, tandem ve üçlü aksların sayısına dönüştürülür:

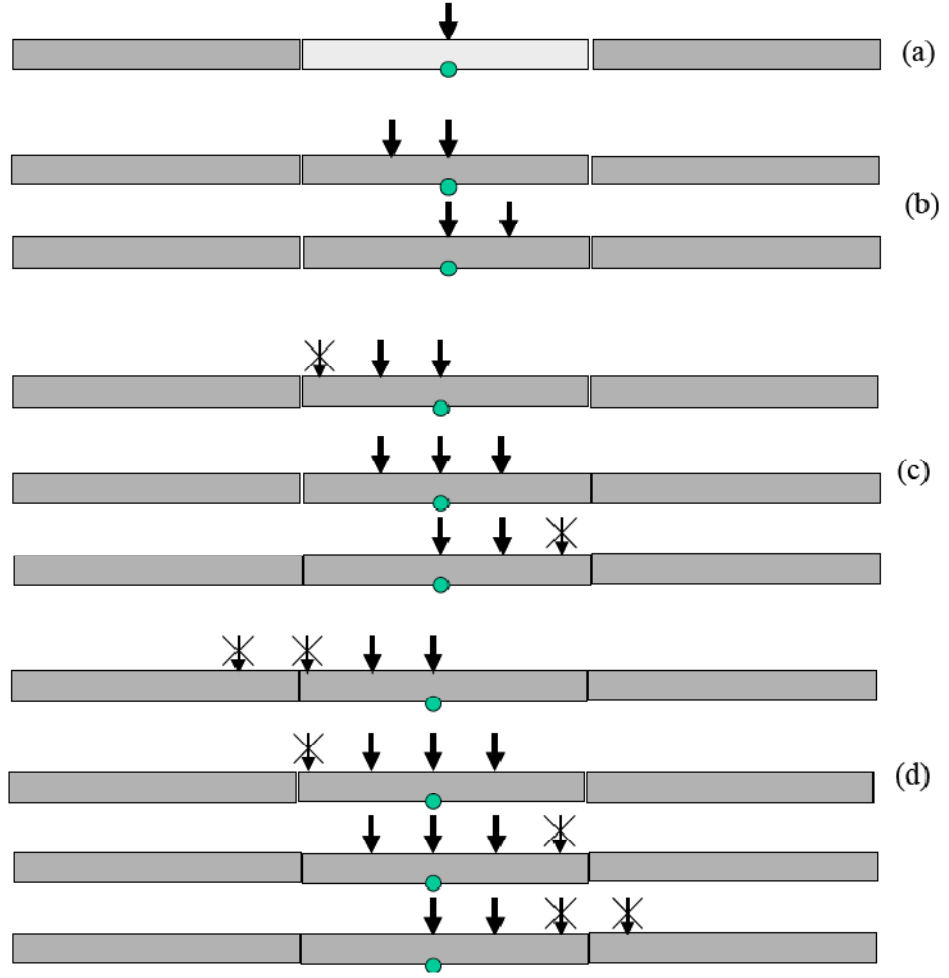
- Gerçek bir tekil dingil, aynı yüke sahip tekil bir dingil uygulamasına etkili olarak eşittir (Şekil 8.23a).
- Gerçek bir tandem dingil, Şekil 8.23b’de gösterildiği pozisyonundaki gibi, aynı yüke sahip iki tandem dingil uygulamasına etkili olarak eşittir.
- Gerçek bir üçlü dingil, toplam yükün (Şekil 8.23c) üçte ikisiyle 2 tandem dingile ve aynı yüke sahip bir üçlü dingile etkili olarak eşittir.
- Gerçek bir dördü dingil, toplam yükün dörtte üçüyle iki üçlü dingile ve toplam yükün yarısıyla iki tandem dingile eşittir (Şekil 8.23d).

Yukarıdan aşağı çatlama için, kısa, orta ve uzun dingil açıklığına sahip kamyonlara göre hesaplanan yükleme sayısı, kısa, orta ve uzun dingil açıklıklı kamyonların yüzdesi ile toplam kamyon sayısı çarpılarak belirlenir. Hem tabandan tavana hem de yukarıdan aşağıya çatlama için, saatlik trafik; saatlik kamyon trafiği dağılım faktörü ile aylık yük uygulamaları çarpılarak hesaplanır.

3. Adım: Sıcaklık profili verilerinin işlem süreci

EICM, rijit tabakanın kalınlığı boyunca eşit olarak aralıklandırılmış 11 sıcaklık noktasını ortaya koymaktadır. Hesaplama uyumluluğu için, her sıcaklık profili, eşdeğer doğrusal sıcaklık farkına çevrilmiş ve eşdeğer doğrusal sıcaklık farkının frekans dağılımı, her takvim ayı için aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

1. Üstyapı sınırında yer alan aşağıdaki yüklemelerle, 2° F’lık artışlara karşılık gelen gerilmelere göre sıcaklık farklılık tablosunun oluşturulur:
 - Aşağıdan yukarıya gerilme – 18000 pound tekil dingil. Dingil, maksimum gerilimin sağlanması için, enine derzlerin tam orta kısmına yerleştirilmelidir.
 - Yukarıdan aşağıya gerilme – 12000 pound’luk tekil dingilli ve 34000 pound’luk tandem dingilli tekil-tandem aks kombinasyonu. Orta büyüklükteki dingil açıklığı kullanılıp, maksimum gerilmeyi yaratmak üzere, konumlandırılır. Yukarıdan aşağıya gerilme için kritik yükleme koşulu Şekil 8.6’da gösterilmektedir.



Şekil 8.23: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda farklı aks tiplerini dikkate alan aşağıdan yukarıya çatlak hasar birikimi: (a) tekil, (b) tandem, (c) üçlü ve (d) dördürlü akslar. [15]

2. Gerçek doğrusal olmayan ısı profiline ve yukarıdaki 1.adımda kullanılan aynı tekerlek yüklerine karşılık gelen gerilme belirlenir. Gerilme analizini başlatmadan önce, kombine gerilimin doğru temas koşulları ile açıklanabilmesi için, kalıcı kıvrılma/çarpılma her bir gerçek ısı profiline uygulanmalıdır.
3. 2. adımdaki gerilim eşdeğerliğine dayalı olarak analiz edilen gerçek sıcaklık uygulamasının her birine karşılık gelen eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılığını belirlemek için 1.adımdaki tabloya bakılır.
4. Saatlik sıcaklık farklılıklarının frekans dağılımını elde etmek üzere, takvim ayına göre eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılığı aşağıdaki gibi özetlenir:

- Pozitif sıcaklık farklılıklarının frekans dağılımı – pozitif sıcaklık farklılığı veren (üst alttan daha sıcak) tüm sıcaklık profilleri, aşağıdan yukarıya çatlama için sıcaklık frekans dağılımını belirlemek üzere derlenir.

- Negatif sıcaklık farklılıklarının frekans dağılımı – negatif sıcaklık farklılığı veren (üst alttan daha soğuk) tüm sıcaklık profilleri, yukarıdan aşağı çatlama için, sıcaklık frekans dağılımını belirlemek üzere derlenir.

Girdi varyasyonlarının koordine edilmesi için yılın her bir ayı için elde edilen sıcaklık-farklılıkları frekans dağılımlarının, girdi değişimleri (örneğin, temel rijitliği, efektif taban zemini k-değeri ve nemsel çarpımlar) koordine edilmesi için, aylık olarak göz önünde bulundurulur.

Eşdeğer doğrusal sıcaklık-farklılıkları frekans dağılımları, saat başı ölçümlenen sıcaklık profillerine dayalıdır; böylece, yorulma hasarı hesaplaması, saatlik ölçümlere dayalı olarak uygulanır. Sıcaklık doğrusallaştırma prosedürünün ayrıntıları, kılavuzda Ek KK’da verilmektedir.

4. Adım: Aylık bağıl nemlilik verilerinin işlenmesi

Neme bağlı çarpılma, atmosfer bağıl nemine dayalı olarak her ay ayarlanmaktadır. Neme bağlı çarpılmadaki aylık değişimin etkileri, eşdeğer sıcaklık farklılığı şeklinde ifade edilir ve gerilme hesaplamaları sırasında eşdeğer doğrusal sıcaklık farkına eklenir.

$$ETG_{shi} = \frac{3 \cdot (\varphi \cdot \varepsilon_{su}) \cdot (S_{hi} - S_{h\text{ ave}}) \cdot h_z \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{h_z}{3} \right)}{\alpha \cdot h^2 \cdot 100} \quad (8.6)$$

ETG_{shi} = yıllık ortalamadan i ayındaki nemsel çarpılmanın eşdeğer sıcaklık farkı, °F.

φ = elastik rötre faktörü, toplam rötrenin bölümü. Daha doğru bilgi elde olmadığı sürece 0.5 değeri kullanılır.

ε_{su} = maksimum rötre (ε_{su} portland çimentosu betonu karışım özelliklerine dayanan kılavuzda; BÖLÜM 2, Kısım 2’deki eşitlikle hesaplanabilir), $\times 10^{-6}$

S_{hi} = i ayı için bağıl nem faktörü

$$\begin{aligned}
S_{hi} &= 1.1 \cdot RH_a && \text{için } RH_a < 30\% \\
S_{hi} &= 1.4 - 0.01 \cdot RH_a && \text{için } 30\% < RH_a < 80\% \\
S_{hi} &= 3.0 - 0.03 \cdot RH_a && \text{için } RH_a \geq 80\%
\end{aligned} \tag{8.6a}$$

RH_a = ortalama çevresel bağıl nem, yüzde

Sh_{ave} = yıllık ortalama bağıl nem faktörü. Shi 'nin yıllık ortalaması

h_s = rötre zonunun derinliği (genellikle 2 in (5 cm))

h = portland çimentosu betonu plak kalınlığı, in.

α = portland çimentosu betonu termal genleşme katsayısı, $1/^\circ F$

Ortaya çıkması zaman alan maksimum rötreyle dayalı olan Formül 8.6 eşitliği ile, nemsel çarpımadaki aylık sapmaların sıcaklık-farklılığı eşdeğeri verilmiştir.

Yerleştirmeden t gün sonraki herhangi bir zamandaki ETG_{Shi} :

$$ETG_{SHt} = S_t \cdot ETG_{Shi} \tag{8.7}$$

ETG_{SHt} = Portland çimentosu betonu yerleşiminden t gün sonra her hangi bir zamandaki ETG_{Shi} , $^\circ F$.

ETG_{Shi} = yıllık ortalamadan i ayındaki nemsel çarpılmanın eşdeğer sıcaklık farkı, $^\circ F$

$$S_t = \frac{Age}{n + Age} \tag{8.8}$$

S_t = nemle ilişkili plak çarpımları için zaman faktörü

Age = yerleştirmeden itibaren portland çimentosu betonu yaşı,

n = maksimum rötrein %50'sinin gelişimi için gereken süre, gün. Daha doğru bilgiler elde olmadığı sürece 35 gün kullanılır.

5. Adım: Gerilme hesabı

Analiz gereksinimi duyulan tüm durumlar için gerilme hesaplanır. Durum sayısı, hasar artımına bağlıdır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamlar için, aşağıdaki artımlar gözönünde bulundurulmalıdır:

- Üstyapı yaşı – yıl olarak.

- Mevsim – ay olarak.
- Yükleme biçimi – aşağıdan yukarı çatlak için dingil tipi; yukarıdan aşağıya çatlak için dingil açıklığı.
- Yükleme düzeyi – dingil tipine bağlı olarak değişen; 1000 (0.45 ton) den 3000 lb (1.35 ton)’a kadarki artımlarla ayırık yükleme seviyeleri.
- Sıcaklık gradienti – 2° F’lık artışlarda yukarıdan aşağıya elde edilen eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılığı.
- Yanal yükleme pozisyonu – hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarı çatlamlar için 6 önemli lokasyon.

Hasar artımları ve gerilme hesaplaması bu kısımda daha önce tartışılmıştır.

6. Adım: Yorulma hasarının hesaplanması

Daha önce tartışıldığı gibi, kayda değer bir şekilde farklı gerilmeler yaratan tüm durumlar, doğru sonuçlar elde edebilmek için, yorulma analizlerinde ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamlar için, tüm kritik faktörleri dikkate alan yorulma hasarı birikimleri konusundaki genel ifade aşağıdaki gibidir:

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m,n}}{N_{i,j,k,l,m,n}} \quad (8.9)$$

FD = toplam yorulma hasarı(yukarıdan aşağıya-aşağıdan yukarıya)

$n_{i,j,k,l,m,n}$ = i, j, k, l, m, n, koşullarında uygulanan yük uygulama sayısı

$N_{i,j,k,l,m,n}$ = i, j, k, l, m, n, koşullarında izin verilebilir yük uygulama sayısı

i = yaş (portland çimentosu betonu kopma modülündeki, tabaka adreans koşullarındaki, banket yük transfer etkinliği detorasyonlarındakideğişim için hesap).

j = ay (temeldeki ve taban zemini reaksiyonunun efektif dinamik modülündeki değişim için hesap)

k = dingil tipi (aşağıdan yukarıya çatlamlar için tekil, tandem ve üçlü; yukarıdan aşağıya çatlamlar için kısa, orta ve uzun dingil açıklığı)

l = yük düzeyi (herbir dingil tipi için artışlı yük)

m = sıcaklık farkı

n = trafik yolu

Hasar artışları, daha önce bu kısımda tartışılmıştır. Uygulanan yüklemelerin sayısı ($n_{i,j,k,l,m,n}$), her koşul altında (yaş, mevsim ve sıcaklık), n trafik yolundan geçen l yük düzeyine ait k tipi gerçek dingil sayısıdır. İzin verilen yükleme uygulamalarının sayısı, yorulma bozulmasının beklendiği (%50 plak çatlamasına denk gelen) yük periyodu sayısıdır ve uygulanan gerilme ile portland çimentosu betonu dayanımının bir fonksiyonudur. Uygun görülen yükleme uygulamaları sayısı, aşağıdaki yorulma modeli kullanılarak belirlenebilir:

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \cdot \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2} + 0.4371 \quad (8.10)$$

$N_{i,j,k,...} = i, j, k, l, m, n...$ koşullarında izin verilebilir yük uygulama sayısı

$MR_i = i$ yaşındaki portland çimentosu betonu kopma modülü, psi.

$\sigma_{i,j,k,...} = i, j, k, l, m, n...$ koşullarında uygulanan gerilme

$C_1 =$ kalibrasyon sabiti= 2.0

$C_2 =$ kalibrasyon sabiti= 1.22

Yorulma hasarı hesaplaması, bir sayısal entegrasyon şemasının dışında, herbir hasar artımından gelen hasarların toplandığı basit bir procestir ve trafik gezinim etkilerinin kesin olarak elde edilmessi için kullanılır. Üstyapı ayrıtından (j noktası) herhangi bir rassal mesafe uzaklığında, yerleştirilmiş dingil yüklemesinin neden olduğu kritik hasar bölgesindeki yorulma hasarı, aşağıda verilmektedir:

$$FD_{ij}^* = P(COV_j) \cdot FD_{ij} \quad (8.11)$$

$FD_{ij}^* = i$ bölgesindeki (kritik hasar bölgesi) j noktasından geçen uygulanmış toplam trafiğin kesirinden kaynaklanan yorulma hasarı

$P(COV_j) = j$ noktasından geçebilecek trafik olasılığı

$FD_{ij} = i$ bölgesindeki (kritik hasar bölgesi) j noktasından geçen uygulanmış trafikten kaynaklanan yorulma hasarı

$$NORMDIST = \frac{1}{SD_{traf} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (8.12)$$

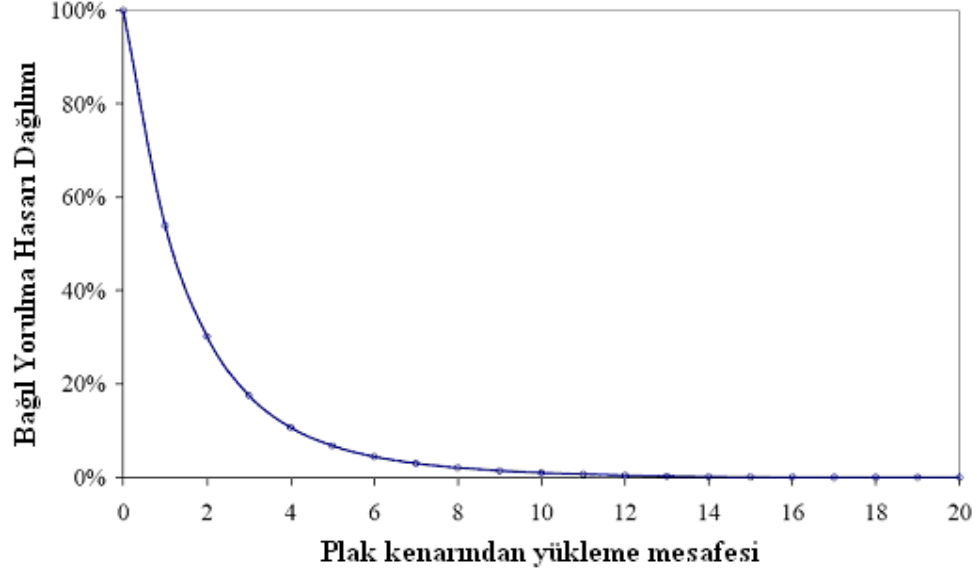
NORMDIST = yoğunluk fonksiyonu normal dağılımı

X = tekerlek yeri- plak kenarından (veya genişletilmiş plak için şerit çizgisinin dışı) en dıştaki tekerleğin en dış alnına kadar olan mesafe, in.

μ = ortalama tekerlek yeri, in.

SD_{traf} = trafik gezinim standart sapması, in.

Üstyapı ayrıtından farklı mesafelerdeki trafik geçişlerinden kaynaklanan yorulma hasarı katkısı, Şekil 8.24’de gösterilmektedir. Tüm trafik geçişlerinden kaynaklanan toplam yorulma hasarı, tüm trafik yolları boyunca geçen trafiğin neden olduğu hasarın toplanması ile bulunmaktadır. Bu hasar, basitçe, Şekil 8.24’de gösterilen eğrinin altında kalan alandır. Eğrilerin altında kalan alan, ince şeritlere bölünerek hesaplanabilir fakat en doğru sonuçlar, sayısal entegrasyon yöntemleri kullanılarak çok daha etkin bir şekilde elde edilebilir. Hem derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama modeli için, hem de sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi modeli için Gauss entegrasyon yöntemi kullanılmaktadır. Aşağıda ana hatları verilen Gauss sayısal entegrasyon şemasının kullanımı, çok küçük yükleme pozisyonu artışları kullanılarak yapılan gerilim analizlerine eşdeğerdir. Bu yöntemde, fonksiyon değeri, önceden belirlenen bölgede hesaplanmakta ve ilgili ağılık faktörleri, aşağıdaki gibi, polinomiyal fonksiyonların altındaki alanı belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 8.24: Rijit plak sınırından sınırından farklı uzaklıktaki trafik geçişlerine göre yorulma hasar katkısının gösterimi

$$\int_a^b f(x) dx = A \cdot \sum_{i=0}^n f(x_i) \cdot w(x_i) \quad (8.13)$$

$f(x)$ = integrali alınan fonksiyon

A = ölçek faktörü, kayda değer ölçüde yorulma hasarı doğuran trafik kanalı genişliği (aşağıdan yukarıya çatlamlar için 2 in (5 cm); yukarıdan aşağıya çatlamlar için 40 in (1 m))

$f(x_i)$ = normallestirilmiş x_i (-1'den 1'e) bölgesindeki fonsiyon değeri

$w(x_i)$ = normallestirilmiş x_i (-1'den 1'e) bölgesindeki fonsiyon değeri için ağırlık faktörü

Gauss entegrasyon yöntemi, n 'in kullanılan hesaplama noktası sayısı olduğu, tam olarak, $2n-1$ derece polinomların entegrasyonunu hesaplar. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama modeli ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi modeli'nin her ikisi için entegrasyon iki parçalı uygulanabilir, çünkü bağıl yorulma hasarı katkısı eğrileri (örneğin, Şekil 8.24) üstyapı ayrıtına yaklaştıkça yüksek bir değişkenlik göstermekte ama ayrıta uzaklaştıkça oldukça düzleşmektedir. Tekli polinomiyal fonksiyon, yüksek değişkenlik ve düzleşme gösteren her iki alanı kapsayan grafik eğrilerinde, yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, 4-noktalı Gauss entegrasyonu dış çizgi şeridi için kullanılırken, 2-noktalı Gauss

entegrasyonu iç kısım için kullanılmaktadır. 2 ve 4-noktalı Gauss entegrasyonu için tespit edilen değerlendirme noktaları ve ağırlık faktörleri aşağıdaki gibidir:

- 2-noktalı Gauss entegrasyonu:
 - Değerlendirme noktası: $\pm \frac{1}{\sqrt{3}}$ Ağırlık faktörü: 1
- 4-noktalı Gauss entegrasyonu:
 - Değerlendirme noktası: $\pm \sqrt{\frac{3+2r}{7}}$ Ağırlık faktörü: $\frac{1}{2} - \frac{1}{6r}$
 - Değerlendirme noktası: $\pm \sqrt{\frac{3-2r}{7}}$ Ağırlık faktörü: $\frac{1}{2} + \frac{1}{6r}$
 - $r = \sqrt{1.2}$

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda aşağıdan yukarı çatlama için, aşağıdaki entegrasyon planı uygulanmaktadır:

- Dikkate alınan trafik yolunun toplam genişliği: 20 inç.
- 8 inç boyalı dış şerit: 4-noktalı Gauss entegrasyonu.
 - Gauss noktaları: Rijit plak ayırıtından 0.5555, 2.640, 5.360 ve 7.445 inç.
 - Ağırlık faktörleri: Yukarıda listelenen Gauss referans noktalarının dizilişi; 0.34785, 0.65215, 0.65215 ve 0.34785 olmaktadır.
- Kalan 12 inçlik iç boyalı şerit: 2-noktalı Gauss entegrasyonu.
 - Gauss referans noktaları: Rijit plak ayırıtından 10.54 ve 17.46 inç.
 - Ağırlık faktörleri: 1.0 ve 1.0.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yukarıdan aşağı çatlama için, aşağıdaki entegrasyon planı uygulanmaktadır:

- Dikkate alınan trafik güzergahının toplam genişliği: 40 inç.
- 8 inç boyalı dış şerit: 4-noktalı Gauss entegrasyonu.
 - Gauss noktaları: Rijit plak ayırıtından 1.666, 7.920, 16.080 ve 22.334 inç.
 - Ağırlık faktörleri: Yukarıda listelenen Gauss referans noktalarının dizilişi; 0.34785, 0.65215, 0.65215 ve 0.34785 olmaktadır.

- Kalan 12 inçlik iç boyalı şerit: 2-noktalı Gauss entegrasyonu.
 - Gauss referans noktaları: Beton plaka ayırıtından itibaren 27.381 ve 36.619.
 - Ağırlık faktörleri 1.0 ve 1.0

Her bir üstyapı yaşı, ayı, dingil tipi, dingil yüklemesi ve sıcaklık farklılığı altında 6 Gauss referans noktası için hesaplanan gerilmeler her bir koşula ait kombinasyonda trafik gezinimini de dikkate alan hasarın hesaplanmasında kullanılmaktadır. İşlem, toplam hasarın belirlenmesi için her bir özetlenen koşulda tüm yukarıda saydığımız parametrelerin faktörleri tekrar edilip hasar hesaplanıp toplanarak toplam hasar hesaplanır.. Aynı işlem aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı hasar hesaplaması için kullanılmaktadır.

Çatlama Güvenilirliği

Güvenilirlik tasarımı arzu edilen güvenilirlik derecesinde tahmin edilen çatlama belirlenmede aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} CRACK_P &= CRACK + STD_{CR} \cdot Z_P \\ CRACK_P &\leq 100 \% \end{aligned} \quad (8.14)$$

$CRACK_P$ = P güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen çatlama, plak yüzdesi.

$CRACK$ = ortalama girdilere (%50 güvenilirlikle ilgili olarak) dayalı tahmin edilen çatlama, plak yüzdesi.

STD_{CR} = tahmin edilen ortalama çatlama düzeyindeki çatlamanın standart sapması:

$$STD_{CR} = -0.00172 CRACK^2 + 0.3447 CRACK + 4.6772 \quad (8.15)$$

Z_P = standart normal sapma

Örneğin ortalama girdilere dayalı olarak tahmin edilen çatlama %10 ise %90'lık güvenilirlik tasarımı için tahmin edilen çatlama aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} STD_{CR} &= -0.00172 \cdot 10^2 + 0.3447 \cdot 10 + 4.6772 \\ &= 8.0\% \end{aligned}$$

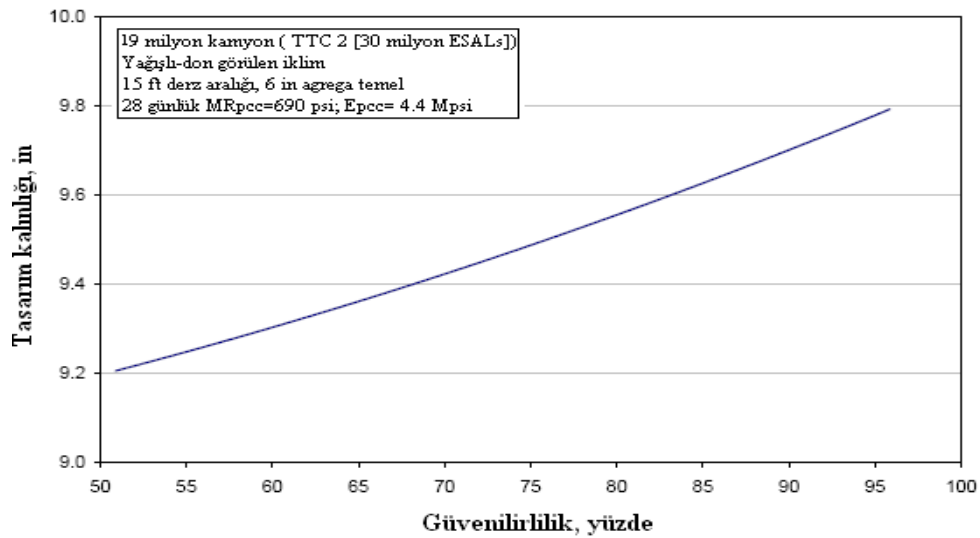
$$Z_P = 1.28$$

$$CRACK_P = 10 + 8.0 \cdot 1.28$$

= %20.2

Böylece, tasarım kriteri, %90'lık güvenilirlikte, %10'luk plak çatlağından daha düşükse; yapısal kapasite, CRACK_P %10'un altına düşünceye kadar arttırılmalıdır. Formül 8.15 denklemi yerel kalibrasyona dayalı olarak değiştirilebilir.

Şekil 8.21 ortalama girdi (%50 güvenilirlik) ve %95 tasarım güvenilirliğine dayalı olarak tasarım ömrü boyunca tahmin edilen çatlama örneğini göstermektedir. Şekil 8.25 örnek tasarımın farklı güvenilirlik seviyelerinde istenen plak kalınlığını göstermektedir. Farklı plak kalınlıklarına karşılık gelen güvenilirlik seviyesi bu şekilden de elde edilebilir.



Şekil 8.25: Örnek bir tasarım için farklı güvenilirlik seviyesinde istenen rijit plak kalınlıkları

Enine Çatlamayı Azaltmak İçin Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılarda Yapılan Modifikasyon

Tahmin edilen çatlama, tasarımın ön gördüğünden daha büyük ise, deneme tasarımı yapısal kapasiteyi arttırmak için yeniden düzeltilmelidir. Aşağıdan yukarıya enine çatlamayı etkileyen aynı faktörler yukardan aşağıya çatlamayı da etkiler. Buna rağmen, farklı tasarım parametreleri farklı performans ölçümlerinde farklı etkilere sahiptir. Örneğin rijit plak kalındığı ve portland çimentosu betonu kalitesi derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama etki eden dominant faktörlerdir. Ama kırılma ve pürüzlülük üzerindeki etkileri daha azdır. Diğer taraftan, genişletilmiş rijit plak hem rijit plak çatlağı hem de kırılma üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Dolayısıyla, tüm performansın geliştirilmesi gerekiyorsa genişletilmiş plakların gözönünde bulundurulması gerekirken; plak çatlamasının tek tasarım yetersizliğini meydana getirdiği durumlarda ise tasarım gerekliliklerini karşılayabilmek için plak kalınlığı ve portland çimentosu betonu dayanımı arttırılabilir.

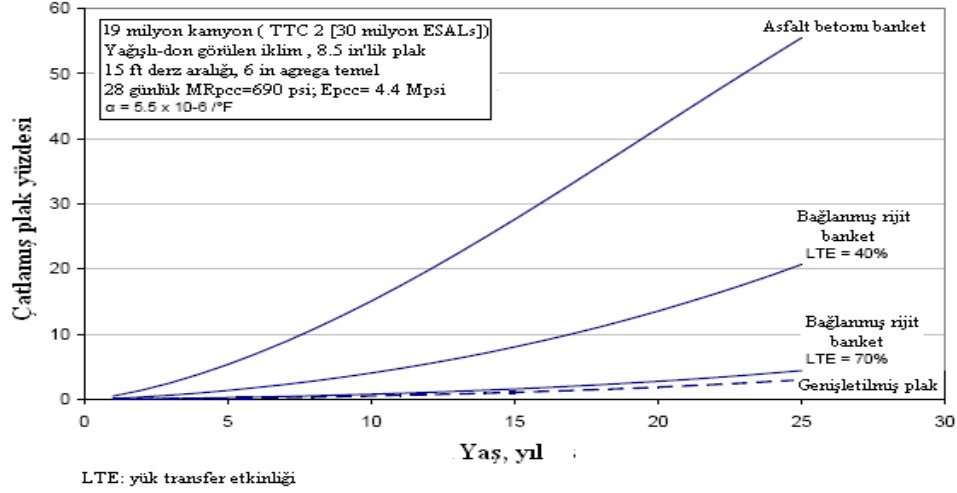
Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda yorulmayla ilgili enine çatlama, aşağıdaki yöntemlerle etkin bir şekilde denetim altına alınabilir:

- Rijit plak kalınlığının arttırılması.
- Derz aralığının azaltılması.
- Bağlanmış rijit banketlerin sağlanması,
- Genişletilmiş rijit plağın kullanımı.
- Daha yüksek dayanımlı portland çimentosu betonu karışımının (portland çimentosu betonu ısıl genleşme katsayısı- α_{PCC} , rötre ve elastik modül değerlerininin tümünün değişebileceğine dikkat ediniz) kullanımı.
- Stabilize edilmiş temel kullanımı.

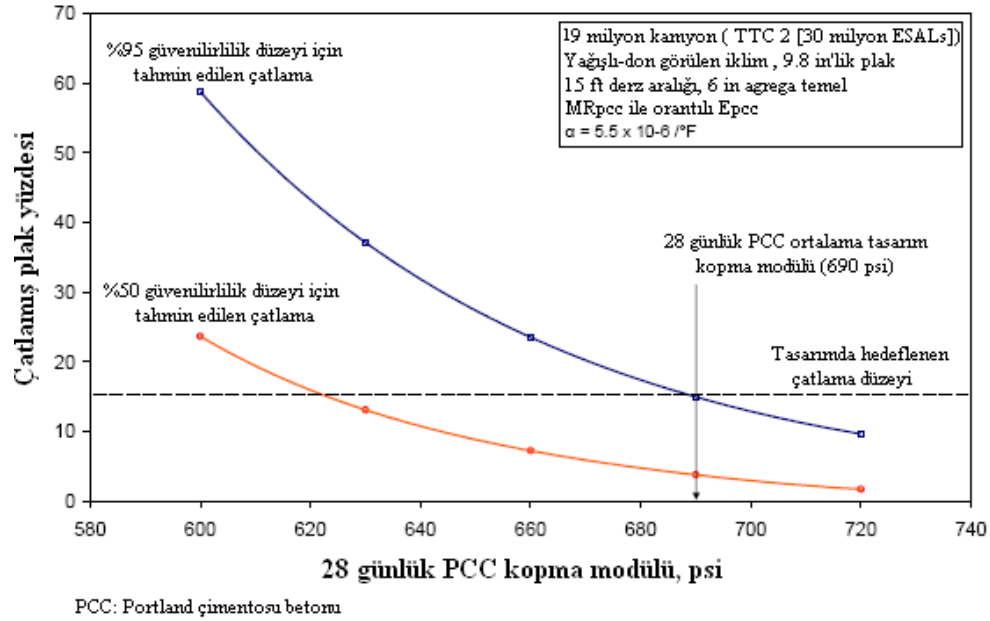
Rijit plak kalınlığı ve derz aralığı derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlamaya etki eden çok hassas faktörlerdir. Rijit plak kalınlığı ve derz aralığına göre derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama duyarlılığı Şekil 8.15 de gösterilmektedir. Üstyapı desteklik özelliklerine (genişletilmiş beton kalıp ve bağlantılı PCC banketi) göre derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda çatlama duyarlılığı Şekil 8.26'da gösterilmektedir. Bağlanmış rijit banket yardımıyla elde edilen yapısal kapasite yaklaşık 1 inçlik rijit plak kalınlığına eşdeğerdir. Genişletilmiş rijit plak nedeniyle yapısal kapasitedeki artış yaklaşık 1.5 inçlik rijit plaka kalınlığına denktir.

Portland çimentosu betonunun kopma modülünün etkisi Şekil 8.27'de gösterilmektedir. Bu şekilde, portland çimentosu betonunun elastik modülünün kopma modülüne olan oranının sabit (örneğin, portland çimentosu betonunun modülleri portland çimentosu dayanımı ile oransal olarak değişim gösterir) kaldığı varsayılmaktadır. Buna rağmen, ısıl genleşme katsayısı- α_{PCC} ve rötre sabit (değiştirilmesi sunulan sonuçları değiştirecektir) kalmaktadır. Şekil 8.28 temel tipinin sonuçlarını göstermektedir. Temel tipi bozulma konusunda çok daha fazla etkileye sahiptir.

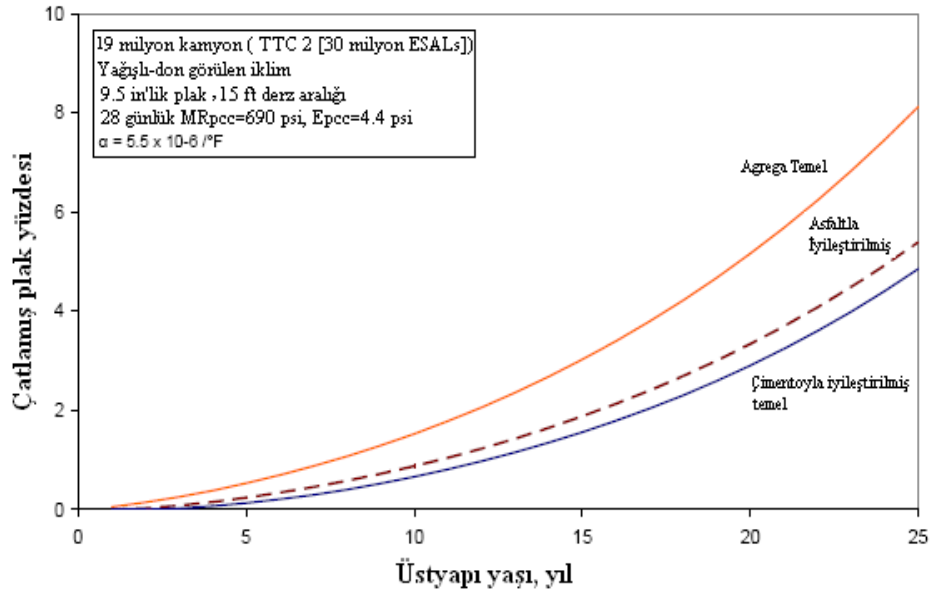
İstenen rijit plak kalınlığının belirlenmesine ait tekrarlı süreç, Şekil 8.29'da gösterilmektedir. Farklı deneme rijit plak kalınlıkları için elde edilen sonuçlar, istenen rijit plaka kalınlıklarını belirlemek üzere grafiğe aktarılabilir. Uygulamada, rijit plak kalınlığı bir sonraki uygulama birimine göre yuvarlanabilir (en yakın 0.5 inç).



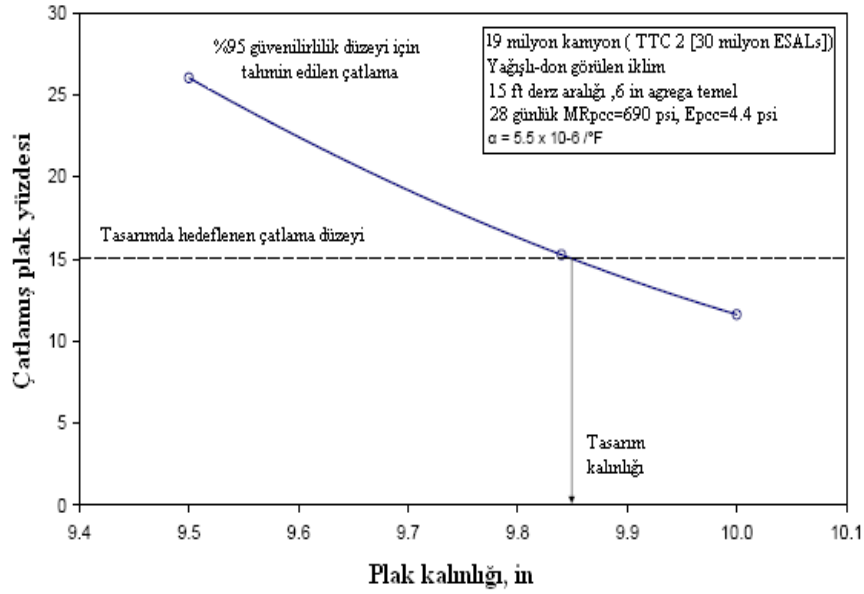
Şekil 8.26: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların eninene çatlamları üzerinde kenar desteklik özelliklerinin etkileri. [15]



Şekil 8.27: Portland çimentosu betonunun elastik modülünün ve dayanımına oranı sabit tutulduğunda, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlamların portland çimentosu betonunun dayanımına göre değişimi. (Eğer çimento içeriği arttırılırsa, α_{PCC} ve rötreinin dayanıma bağlı olarak değişebileceğini göz önünde tutulmalıdır.) [15]



Şekil 8.28: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda temel tipinin enine çatlamalara etkisi [15]



Şekil 8.29: İstenen rijit plak kalınlığını belirlemede tekrarlı süreç. [15]

8.5.4 Performans Tahmini – Enine Derz Bozulmaları

Enine derz bozulması, rijit plak ayrıtından (standart şerit genişliği için düşünülen boyuna derz) ya da genişletilmiş rijit plak için en sağdaki şeridin boyalı çizgilerinden itibaren yaklaşık 1 ft (0.3 m) olarak ölçülen derz boyunca uzanan diferansiyel yükselmedir.

Enine derz bozulması derzden derze önemli miktarda değişim gösterdiğinden bir üstyapı kesitindeki tüm enine derzlerin ortalama bozulması, model aracılığı ile belirlenen parametredir. Sürüş kalitesi üzerindeki etkisi nedeniyle; derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda kırılmalar önemli bir bozulma mekanizmasıdır. Derz bozulmasının aynı zamanda, erken rehabilitasyon nedeniyle artan maliyetler açısından ve bozulmanın ileri aşamaya ulaştıkça araç işletme maliyetleri üzerinde etkili olması nedeniyle üstyapının faydalı ömrünün maliyeti üzerinde önemli bir etkisi vardır. Enine derz bozulmaları aşağıdaki kombinasyonun sonucudur:

- Dinamik ağır dingillerin tekrarlı uygulamaları.
- Derz boyunca yetersiz yük transferi.
- Rijit plak altında serbest haldeki nem.
- Temel/alt-temel, taban zemini veya banket temeli malzemesindeki erozyon
- Rijit plağın yukarı doğru kıvrılması.

Zemin materyalindeki erozyon, tekerlek yükü rijit plağın köşelerine doğru yaklaştıkça rijit kalıbın alt kısmındaki aşırı nemin dışarıya doğru hareket etmesi ile ortaya çıkar. Temel, banket ve/veya taban zemininin ince malzemelerini taşıyan nem, dışarıya doğru hareket ettirildiğinde rijit plak köşeleri altında boşluklara neden olur. Daha da önemlisi bu hareket sebebiyle komşu rijit plaka altında meydana gelen tortu komşu plağın yukarıya doğru kalkmasına neden olur. Bu geçiş de çoğunlukla enine eklem boyunca gerçekleşir. Plak altındaki malzemenin artan gelişimdeki hareketi ile köşe kırılmaları ve çatlakları ortaya çıkabilir. Aşağıdaki faktörlerin enine derz kırılmalarına etki ettiği görülmüştür:

- Kayma donatısının çapı ve varlığı
- Rijit plak kalınlığı

- Derz aralığı
- Stabilize temel tabakasının kullanımı ve malzemenin dayanımı ve durabilitesi.
- Taban zemini tipi
- Desteklenmemiş üstyapı ayrıtlarına yakın olan araç yüklemeleri.
- Zayıf rijit plak ayrıt desteği (örneğin; genişletilmiş üstyapı şeritlerinin, bağlanmış rijit banketlerin veya kenar kirişlerinin yokluğu).
- Yağış
- Açık gradasyonlu temel tabakasını içeren yüzey-altı drenajı.
- Donma indeksi / donma-çözülme periyotlarının sayısı.
- Kalıcı kıvrılma ve çarpılmaları içeren, rijit plak kıvrılması ve bükülmesi.
- Portland çimentosu betonunda iri daneli agrega kullanımı ve agrega tipi (bu prosedürde hesaba katılmamıştır fakat şartnameler aracılığı ile kontrol edilmelidir.)
- Derz açıklığı (portland çimentosu betonunun sıfır-gerilme sıcaklığı- gerçek rijit plak ısısı + portland çimentosu betonu rötresi)

Kırılma Modeli

Ortalama enine derz bozulması artırımı yaklaşım kullanılarak tahmin edilmektedir. Bozulma artışı her ay belirlenmekte ve mevcut bozulma seviyesi artışın büyüklüğünü etkilemektedir. Üstyapının trafiğe açıldığı andan itibaren üstyapı ömrünce daha önceki aylardaki bozulma artışlarının toplamıyla elde edilen herbir aydaki bozulma için aşağıdaki model kullanılır:

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i \quad (8.16)$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} * (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i \quad (8.17)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 * \sum_{j=1}^n DE_j * \text{Log}(1 + C_5 * 5.0^{EROD})^{C_6} \quad (8.18)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} * \delta_{curling} * \left[\log(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \log\left(\frac{P_{200} * WetDays}{P_i}\right) \right]^{C_8} \quad (8.19)$$

Fault_m = m ayının sonundaki ortalama derz bozulması, in.

ΔFault_i = i ayı boyunca enine derz bozulması anlamındaki artışlı değişim (aylık), in.

FAULTMAX_i = i ayı için maksimum ortalama enine derz bozulması, in.

FAULTMAX₀ = baştaki maksimum ortalama enine derz bozulması, in.

EROD= temel/alttemel aşınabilirlik faktörü

DE_i = i ayı boyunca hesaplanan diferansiyel deformasyon enerjisi

EROD= temel/alttemel aşınabilirlik faktörü

δ_{curling} = sıcaklık kıvrılmasından ve nemsel çarpılmalardan kaynaklanan portland çimnetosu betonu plak köşesininin yukarıya doğru maksimum aylık ortalama defleksiyonu

P_s = taban zemini üzerindeki aşırı yük, lb.

P₂₀₀ = #200 no'lu elekten geçen taban zemini malzeme yüzdesi

WetDays = yıllık ortalama yağışlı gün sayısı

C₁'den C₈'e kadar ve C₁₂, C₃₄ ulusal kalibrasyon sabitleri:

$$C_{12} = C_1 + C_2 * FR^{0.25} \quad (8.20)$$

$$C_{34} = C_3 + C_4 * FR^{0.25} \quad (8.21)$$

$$C_1 = 1.29 \quad C_5 = 250$$

$$C_2 = 1.1 \quad C_6 = 0.4$$

$$C_3 = 0.001725 \quad C_7 = 1.2$$

$$C_4 = 0.0008$$

FR = temelin üst noktasındaki sıcaklığın donma derecesinin (°F 32) altında olduğu zamanın yüzdesi olarak tanımlanan temel donma indeksi.

İstatistik model:

$$R^2 = 0.71$$

$$SEE = 0.029 \text{ inch (0.07 cm)}$$

N = 564 gözlem

8.16'daki denklemde verilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine derz kırılma modeli 22 eyaletle yer alan 248 saha kesiminin performansına dayalı olarak elde edilen kalibrasyonun bir sonucu olup kayma donatılı ve kayma donatısız olan derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların her ikisi için de uygulanabilir. Kalibrasyon kesimleri LTPP'nin 138 ayrı GPS-3 ile SPS-2 ve FHWA'nın rijit üstyapıların performansı çalışmasından 110 ayrı kesimini içermektedir. Kesimlerin 1/3'ünden fazlası (86 ayrı kesim) kayma donatısızdır. Kalan diğer kesimlerdeki kayma donatısı çapı 1 inçten 1.5 inç kadar değişiklik gösterir.

Kırılma İçin Yapısal Tepki Modeli

Kritik kamyon aks yüklemesi Şekil 8.7'de gösterildiği gibi rijit plak köşesine yaklaşık olarak yerleştirilen; tekli, ikili, üçlü yada dördü aksı içermektedir. Boyuna şerit-banket derzine daha yakın olan yükleme, rijit plak köşelerinin defleksiyonunu artırır. Yaklaşık derzlerdeki defleksiyonlar; rijit plak derz tasarımına, temel tabakasının rijitliğine ve taban zemininin rijitliğine göre bağlı olarak değişiklik gösterir. Kırılma, zamanla doğrusal olmayan bir şekilde gelişme gösterir. Diferansiyel köşe defleksiyonu (derzin yüklü ve yüklü olmayan tarafı arasındaki farklılıklar), kırılmayı etkileyen kritik bir faktördür. Diferansiyel köşe defleksiyonu derzin yük transfer etkinliğinin bir fonksiyonudur. Enine derz boyunca yük transfer etkinliği modellenmekte ve zamanla değişim göstermektedir (mevsimsel değişim ve uzun dönemli bozulma). Ana şerit banket derzindeki yük transfer etkinliğinin zamana göre sabit olduğu varsayılmaktadır. Rijit plak köşelerindeki defleksiyonların şiddetini etkileyen aşağıdaki faktörler tasarım rehberi prosedürü tarafından direkt olarak dikkate alınmaktadır:

- Portland çimentosu betonu kalınlığı
- Portland çimentosu betonu elastisite modülü
- Portland çimentosu betonu Poisson oranı
- Portland çimentosu betonu birim ağırlığı

- Portland çimentosu betonu ısıl genleşme katsayısı
- Portland çimentosu betonunun en büyük rötresi
- Temel kalınlığı
- Temel tabakası elastisite modülü
- Portland çimentosu betonu plak ile temel arasındaki ara-yüzeyin durumu (bağlanmamış olduğu varsayılır)
- Derz aralığı
- Taban zemini rijitliği (taban zemini rekasiyonunun dinamik modülü)
- Banket ile sağlanan yük transfer etkinliği
- Enine derzlerdeki yük transfer
- Rijit plak yüzeyinini aşağısı ile yukarısındaki sıcaklık farklılığı (ortalama aylık gece değerleri+portland çimentosu betonundaki kalıcı çarpılma/bükülme+iklimsel değişimlerden kaynaklanan portland çimentosu betonu yüzeyindeki rötreye)
- Portland çimentosu betonunun bağıl nemindeki değişim (iklimsel ve portland çimentosu betonu plak kalınlığı)
- Dingil tipi (tekli, ikili yada üçlü)
- Dingil ağırlığı
- Dingil pozisyonu (kritik plak sınırına olan mesafe) – şerit çizgisinden itibaren 24 in (60 cm)'den daha büyük olmayan trafik geziniminin standart sapmasının -0.6 tekerlek yoluna eşit olarak ayarlanması.

Not 1: Rijit plak ile temel arasındaki yüzey bağlanmamış varsayıldığında, temel birim ağırlığı 0'a eşittir. Bu; rijit plak ile temel arasındaki bağlanmamış ara-yüzeyde normal çekme gerilmelerinin olmadığını yansıtmaktadır ve dolayısıyla temel rijit plağı yükleyememektedir.

Not 2: Temel tabakasının ısı genleşme katsayısının, portland çimentosu betonu ısı genleşme katsayısına eşit olduğu varsayılmaktadır.

Not 3: Şerit-şerit boyuna derzinin defleksiyon yük transfer etkinliğinin %70'e eşit olduğu varsayılmaktadır.

Yukarıdaki birçok parametre tasarım süresince (örneğin, plak kalınlığı ve derz aralığı) sabit kalırken diğer parametreler mevsimlik, aylık, saatlik yada üstyapı yaşı açısından değişim gösterir. Hassas kırılma analizleri sonuçları için, önemli miktarda farklı sapmalar yaratan tüm olaylar birbirinden farklı olarak değerlendirilmelidir. Bu rehberde tanımlanan kırılma hasar artışı aşağıda verilen koşulları dikkate alarak bir aya endeksenerek belirlenmektedir:

- Üstyapı yaşı – portland çimentosu betonu modülündeki değişimleri yıl itibariyle dikkate alır ve stabilize edilmiş zemin ve rijit plak arasındaki yüzeyin aderans durumundaki değişimleri de dikkate almaktadır.

- Ay – Temel rijitliği, taban zemini rijitliği (efektif k değerini de içine alan alt-temel tabakalarındaki nem ve ısı etkisini de içeren) ve diferansiyel rötre nedeniyle rijit plak çarpılmalarındaki üzerindeki bağıl nem aylık değişimlerin etkilerini de dikkate alınır.

- Yükleme düzeyi

Tekli akslar – 1.000 lb (0.45 t) artışlarla 3.000 (1.35 t)– 41.000 lb (18.6 t)

İkili akslar – 2.000 lb (0.90 t) artışlarla 6.000 (2.7 t) -82.000lb (37.2 t)

Üçlü akslar – 3.000 lb (1.35 t) artışlarla 12.000 (5.4 t) – 102.000lb (46.3 t)

Dörtlü akslar – 3.000 lb (1.35 t) artışlarla 12.000 (5.4 t)–102.000lb (46.3 t)

- Sıcaklık – Ortalama aylık gece sıcaklığı profilinin etkileri, kalıcı kıvrılma/çarpılma ve etkin sıcaklık farkı (üst - alt) olarak ifade edilen çarpılmadaki ayırık değişim.

Defleksiyonun belirlenmesinde kullanılan yapısal model aşağıdaki maddeleri dikkate alarak defleksiyonu tahmin edebilecek yeterlilikte olmalıdır:

- Sıcaklık ve tekerlek yükleri – model rijit plak kıvrılması ve çoklu tekerlek yüklemesinin etkilerini dikkate alabilecek yeterlilikte olmalıdır.

- Rijit plağın, altındaki tabakalardan ayrılması.

- Temel tabakasının etkileri - Model, bağlanmamış durumların etkilerini dikkate alabilmelidir.

- Çoklu plaklar ve hem enine hem de boyuna derz boyunca yükün transferi.

Genelde sonlu bir eleman analiz programı gereklidir. Tasarım rehber yazılımındaki sapma hesaplamaları ISLAB2000 kullanılarak yapılan büyük sayıda sonlu eleman analizlerine dayalı olarak geliştirilen nöral (sinirsel) ağları kullanarak

gerçekleştirilmektedir. Nöral ağlar binlerce ISLAB2000 testinin sonuçlarını kullanarak geliştirilmektedir. Bu sinirsel ağlar yukarıda listelenen tüm faktörleri içine alır ve Tablo 8.6’da görülen geniş bir aralıktaki parametreler için ISLAB2000 defleksiyonları ile yakın bir eşleşme gösterir.

Kırılma Tahmin Prosedürü

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardaki enine derz kırılmasının tahmin edilmesi için adım adım izlenecek prosedür bu bölümde sunulmuştur. İlgili adımlar aşağıdakileri kapsamaktadır:

1. Girdi verilerinin tablolaştırılması – Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine derz kırılmasının tahmin edilmesi için için gerek duyulan tüm verilerin özetlenmesi.
2. Trafik verilerinin işleme süreci – İkili, üçlü ve dörtlü akslara ait her bir geçişle ortaya çıkan eşdeğer tekli, ikili ve üçlü dingil sayısının tam olarak belirlenebilmesi için ele alınan trafik verilerinin daha detaylı olarak işlenmesi gerekir.
3. Üstyapı sıcaklık profili verilerinin işlenmesi – EICM (doğrusal olmayan dağılım) kullanılarak oluşturulan saat başı üstyapı sıcaklık profillerinin takvim ayı itibari ile efektif gece farklarına dönüştürülmesi gerekir.
4. Aylık bağıl nem verilerinin işlenmesi –diferansiyel rötre üzerindeki nem koşullarının iklimsel değişiminin etkileri , efektif sıcaklık farklılıkları olarak tanımlanan plak çarpımları açısından değerlendirilir.
5. Başlangıçtaki maksimum bozulmanın hesaplanması.
6. Derz yük transfer etkinliğinin değerlendirilmesi.
7. Mevcut maksimum bozulmanın hesaplanması.
8. Artış için kritik üstyapı tepkilerinin belirlenmesi.

Tablo 8.6: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda bozulma analizleri için hazırlanan köşe defleksiyonlarının hesaplanmasında nöral ağlar için girdi parametrelerinin dağılımı. [15]

Girdi Parametresi	Minimum Değer	Maksimum Değer
Rölatif rijitlik yarıçapı ^a	22.5 in	80 in
Derz aralığı	12 ft	30 ft ^b
Enine derzlerin yük transfer etkinliği	0%	95%
Banketlerin yük transfer etkinliği	0%	90%
Plak kenarına olan dingil mesafesi	0 in	36 in
Dingil görünüş oranı (enden-boya)	10	0.5
Sıcaklık farklığı (tavan-taban)	0 °F	> 55 °F ^c
Dingil ağırlığı, tekil dingil	0 lb	45,000 lb
Dingil ağırlığı, tandem dingil	0 lb	90,000 lb
Dingil ağırlığı, üçlü dingil	0 lb	135,000 lb
Dingil ağırlığı, dörtlü dingil	0 lb	135,000 lb
Tandem ve üçlü dingil aralığı	40 in	70 in

- ^a Karayolları üstyapıları için rölatif rijitlik yarıçapı genellikle 22.5-80 in arasındadır. Rölatif rijitlik yarıçapı için, plak teorisine dayanan bu değerler yukarıdaki limitleri aştığında oldukça hatalı sonuçlar vermeye başlar.
- ^b 30 ft'lik plaklar için verilmiş sonuçlar gerçek derz aralığı 30 ft'den büyük olan derz aralıkları içindir. Aşırı kıvrılma gerilmelerinden dolayı; genellikle, uzun derz aralıkları (20 ft veya daha büyük) önerilmemektedir.
- ^c Portland çimentosu betonunun genişleme katsayısına, k-değerine, portland çimentosu betonu birim ağırlığına, portland çimentosu betonu kalınlığına ve rölatif rijit yarıçapına göre değişir

9. Kesme kapasitesi ve kayma donatısı hasar kayıplarının değerlendirilmesi.

10. Bozulma artışının hesabı.

11. Kümülatif bozulma hesabı.

Varsayımlar

Aşağıdakiler yorulma analizinde öngörülmüştür:

- Artışlı hasar birikimi – Bozulma artışı; tasarım artışı süresince biriken hasara ve mevcut bozulma düzeyine bağlı olarak değişir.
- Üstyapı strüktürü aralarındaki yüzey bağlanmamış olan rijit plak ve temelden oluşan iki-tabakalı bir sistem olarak modellenir. Taban zemininin ve temel tabakalarının kesme dağılımının etkileri efektif dinamik taban zemini reaksiyon modülü kullanılarak hesaplanır.
- Yanal trafik gezinimi; ortalama tekerlek yolu ve standart sapmasını kullanan normal dağılım olarak modellenmektedir. Efektif yük tekerlek izi aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenebilir.

$$x^* = x - 2/3 * SD_{traf} + LW - SW \quad (8.22)$$

x^* = ortalama tekerlek yolu, in.

LW = şerit genişliği, in. Tipik şerit genişliği 12 ft (144 in (3.6 m))

SW = plak genişliği, in.

x = şerit çizgisinden tekerleğin dış yüzüne kadar ölçülen ortalama tekerlek yolu, in.

SD_{traf} = trafik gezinim standart sapması, in.

8.22 denkleminde hesaplanan efektif tekerlek izi 24 inçten büyükse, o zaman 24 inçe (60 cm) eşit olana etkin tekerlek izi analizde kullanılır.

- Temel tabakasının Poisson oranı portland çimentosu betonunun Poisson rasyosuna eşittir.
- Temel tabakasının ısı genleşme katsayısı portland çimentosu betonunun ısı genleşme katsayısına eşittir.
- Temel tabakası boyunca sıcaklık dağılımı sabittir.
- Gündüz koşulları için kullanıcı girdileriyle ilişkili olan geceleyinkî şerit-banket defleksiyon yük transfer etkinliği aşağıdaki gibidir:

$$LTE^*_{sh} = 5 + LTE^*_{sh}/2 \quad (8.23)$$

LTE^*_{sh} = şerit-banket defleksiyonu (gece) efektif yük transfer etkinliği, yüzde.

LTE^*_{sh} = şerit-banket defleksiyonu (gündüz) efektif yük transfer etkinliği, yüzde.

1. Adım: Girdi verilerinin tablolştırılması:

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine derz bozulma tahminleri için gerekli tüm girdilerin tablolştırılması. İstenen parametreler tablo 8.7’de özetlenmiştir. Bu tabloda listelenen girdilere ek olarak, aşağıdaki 2, 3 ve 4’üncü adımlardan elde edilen işlenmiş girdiler derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların yorulma analizleri için gereklidir.

2. Adım: Trafik verilerinin işlenmesi:

Trafik verileri, öncelikle, tasarım dönemi içindeki her ay için beklenen tekli, ikili, üçlü ve dörtlü dingil sayısının belirlenmesinde kullanılır. Bu işlem klavuzda, 2.

BÖLÜM, 4. Kısımda detaylı olarak açıklanmaktadır. Bozulma analizleri için, bir aksın her geçişi sadece tek bir kritik yüklemeye sebep olabilir:

- Gerçek bir tekil dingil, aynı yüke sahip bir tekil dingil uygulamasına etkili olarak eşittir (şekil 8.30a).
- Gerçek bir tandem dingil, aynı yüke sahip bir tandem dingil uygulamasına etkili olarak eşittir(şekil 8.30b).
- Gerçek bir üçlü dingil, toplam yükün üçte ikisiyle tandem dingile ve aynı yüke sahip bir üçlü dingile etkili olarak eşittir. (şekil 8.30c)
- Gerçek bir dördü dingil, eşit ağırlıklı bir üçlü dingile etkili olarak eşittir. (şekil 8.30d).

Maksimum bozulma (kırılma); genellikle gece saatlerinde rijit plak yukarı doğru kıvrıldığında ve derzler açıldığında oluştuğundan saat 8pm den 8am e kadar ki sürede uygulanan sadece dingil yüklerinin tekrarı kırılma analizinde dikkate alınır.

3. Adım: Aylık bağıl nem verilerinin işlenmesi:

Neme bağlı çarpıklık, atmosferik bağıl neme dayalı olarak her ay ayarlanmaktadır. Neme bağlı çarpıklıktaki aylık değişimin etkileri, 8.6 eşitliği ile belirlenen ve 8.8 eşitliği ile üstyapı yaşı için ayarlanan eşdeğer sıcaklık farklılığı adı altında tanımlanmıştır.

Sıcaklık farklılığının, herhangi bir beton yaşındaki neme bağlı bükülmedeki değişim sonuçlarının eşdeğeri 8.7 denklemi kullanılarak elde edilmektedir. Minumum aylık bağıl nem ve bağıl nemin mevsimsel değişimi de derzlerdeki açılmayı etkilemektedir (6. adıma bakın).

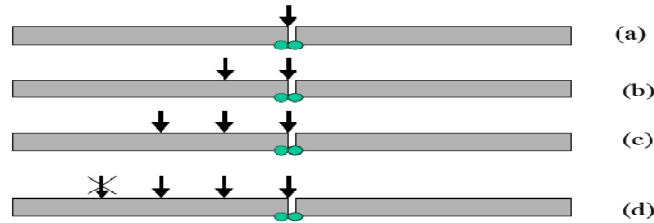
4. Adım: Sıcaklık profili verilerinin işlem süreci:

EICM, mevcut iklimsel verileri kullanarak her saat başı için portland çimentosu tabakasının kalınlığı boyunca eşit olarak ayrılmış 11 noktadaki sıcaklıkları ortaya koyar. Bozulma analizleri için; gece vaktindeki eş değer doğrusal ısı farkı, 8pm den 8am e kadar oluşan üst ve alt beton yüzeyleri arasındaki ortalama fark olarak her takvim ayı için belirlenmektedir. Yılın her ayı için, aylık eş değer sıcaklık profili aşağıdaki gibi belirlenir.

Tablo 8.7: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine derz bozulmalarının önceden tahmini için girdi parametrelerinin özeti. [15]

Girdi	Varyasyon *	Kaynak
Tasarım ömrü (yıl)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Projenin açılış yılı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Açılıştaki PCC yaşı (ay)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Her ay için PCC dayanımı (psi)	Tasarım Ayı	PCC dayanım girdi prosesinin sonucu
Her ay için PCC modülü (psi)	Tasarım Ayı	
Derz aralığı (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Kayma donatısı yarıçapı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Şerit-banket defleksiyonu yük LTE (%)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Genişletilmiş plak (evet/hayır)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Poisson oranı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
PCC birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Termal genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{F}$)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Maksimum rötre birim deformasyonu (10^{-6})	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Elastik rötre birim deformasyonu (10^{-6})	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Max. rötremin %50'si için geçen süre (gün)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Temel kalınlığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Temel birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aylık temel modülü (psi)	Takvim Ayı	İklimsel Analiz Sonuçları
Temel aşınabilirliği	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aylık efektif dinamik taban zemini k-değeri (psi/in)	Takvim Ayı	"E'nin k'ya" çeviriminin sonucu
Kalıcı kıvrılma/çarpılma ($^{\circ}\text{F}$)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
PCC'nin sıfır-genilme sıcaklığı	Sabit	Direkt tasarım girdisi veya inşa ayından ve çimento içeriğinden tahmin edilir
Şerit genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Ortalama tekerlek yolu (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Trafik gezinim standart sapması (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Plak genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi

Tasarım Ayı: Üstyapı yaşına göre değişen parametreler; Takvim Ayı: İklimsel olarak değişen parametreler
PCC:portland çimentosu betonu



Şekil 8.30: Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının hasar birikimi için farklı aks tiplerinin dikkate alınması: (a) tekil, (b) tandem, (c) üçlü ve (d) dördü akşlar. [15]

$$\Delta T_m = \Delta T_{t,m} - \Delta T_{b,m} + \Delta T_{sh,m} + \Delta T_{PCW} \quad (8.24)$$

ΔT_m = m ayı için efektif sıcaklık farklılığı

$\Delta T_{t,m}$ = m ayı için portland çimentosu betonu üst-yüzey ortalama gece sıcaklığı (8 p.m.'den 8 a.m.'ye kadar)

$\Delta T_{b,m}$ = m ayı için portland çimentosu betonu alt-yüzey ortalama gece sıcaklığı (8 p.m.'den 8 a.m.'ye kadar)

$\Delta T_{sh,m}$ = m ayındaki eski beton (örneğin; rötrenin tamamen geliştiği durum) için elastik rötreden kaynaklanan eşdeğer sıcaklık farklılığı

ΔT_{PCWt} = kalıcı kıvrılmadan/çarpılmadan kaynaklanan eşdeğer sıcaklık farklılığı

Portland çimentosu betonu sıcaklık verileri, temel tabakası donma indeksi parametresini ve yük transfer etkinliği ayarlama parametresini bulmak için de kullanılmaktadır. Temel tabakası donma endeksi ,FR, portland çimentosu betonu taban sıcaklığının, donma noktasının (32°F) altında olduğu yıl içindeki zamanların yüzdesi olarak tanımlanmaktadır (hem gündüz hem gece zamanı). Bu parametre 8.20 ve 8.21 denklemlerinde kullanılmaktadır.

Yük transfer etkinliği ayarlama faktörü her takvim ayı için belirlenmektedir. Gece vakitlerindeki, ortalama ortalama portland çimentosu betonu sıcaklığı donma noktasının (32°F) altında kalıyorsa, o ay için belirlenen derz yük transfer etkinliği artırılır. Bu işlem; o ayki temel tabakası yük transfer etkinliğinin %90'a eşit olarak atanması suretiyle yapılmaktadır.

5. Adım: Maksimum Kırılmanın Belirlenmesi:

4. adımda belirlenen her takvim ayı için kullanılan efektif sıcaklık farkı ve karşılık gelen efektif k-değeri ile ay için temel tabakası modülü, plak kıvrılmalarından ve rötre çarpılmasından kaynaklanan köşe defleksiyonları oluşan köşe sapmaları her ay için belirlenmektedir. Köşe defleksiyonları ya sonlu eleman analizi programı yada nöral ağlar (nöral ağlar yöntemi, Tasarım Kılavuzu programında yerine getirilmektedir) kullanılarak belirlenebilir. Başlangıçtaki maksimum bozulma; köşe defleksiyonları ve 8.19 denklemi kullanılarak belirlenebilir.

6. Adım: Başlangıç Eklem LTE'sinin Değerlendirilmesi:

Başlangıçtaki derz yük transfer etkinliğini değerlendirmek için, agregalar arası kenetlenmeden gelen yük transfer etkinliği, (eğer mevcutsa) kayma donatıları ve temel/tabana zemini belirlenir.

Agregalar arası kenetlenmeden gelen yük transfer etkinliği: Derz açıklığına bağlı olarak değişen yük transfer etkinliği, her artış için (aylık) aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir:

$$jw = \text{Max}(12000 * L * \beta * (\alpha_{PCC} * (T_{constr} - T_{mean}) + \epsilon_{sh,m}), 0) \quad (8.25)$$

jw = derz açılması, mils (0.001 in-0.02 mm).

L = derz aralığı, ft

β = temel ile portland çimentosu betonu arasındaki sürtünme katsayısı; 0'a eşit olduğu varsayılır. Stabilize bir temel için 0.65 ve granüler bir temel için 0.85.

α_{pcc} = portland çimentosu betonu termal genleşme katsayısı, in/⁰F

T_{mean} = aylık ortalama (gece) plak orta derinlik sıcaklığı, ⁰F.

T_{constr} = yapım sırasında portland çimentosu betonu sıcaklığı, ⁰F.

$\epsilon_{sh,m}$ = portland çimentosu betonu ortalama rötre birim deformasyonu

Portland çimentosu betonu rötre birim deformasyonu; portland çimentosu betonu malzeme özelliklerine, portland çimentosu betonu bağıl nemine ve portland çimentosu betonu yaşına bağlı olarak değişim gösterir. Portland çimentosu betonunun nemliliği, portland çimentosu betonunun derinliğine bağlı olarak değişir.

$$\epsilon_{sh,m} = \epsilon_{sh,b} + (\epsilon_{sh,t} - \epsilon_{sh,b}) \cdot \frac{h_d}{h_{PCC}} \quad (8.26)$$

$\epsilon_{sh,m}$ = portland çimentosu betonu ortalama rötre birim deformasyonu

$\epsilon_{sh,b}$ = portland çimentosu betonu plağın alt yüzündeki rötre birim deformasyonu

$\epsilon_{sh,t}$ = portland çimentosu betonu plağın üst yüzündeki rötre birim deformasyonu

h_d = portland çimentosu betonu plak yerleştirilirken daha kuru kısmın derinliği, 2'ye eşit alınır

h_{pcc} = portland çimentosu betonu plağın kalınlığı, in.

Rijit plakanın yüzeyindeki röte birim deformasyonu aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$\varepsilon_{sh,t} = \varepsilon_{su} S_t (S_{hmax} - \phi S_{hi}) \quad (8.26a)$$

ε_{su} = maksimum rötre

S_{hi} = i ayı için bağıl nem faktörü

S_{hmax} = maksimum ortalama bağıl nem faktörü. S_{hi} 'nin maksimum değeri.

S_t = nemle ilişkili plak çarpımları için zaman faktörü (formül 8.7)

Rijit plakanın altındaki röte birim deformasyonu aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$\varepsilon_{sh,b} = \varepsilon_{su} S_t S_{hbot} \quad (8.26b)$$

ε_{su} = maksimum rötre

S_{hbot} = portland çimentosu betonu plağın altındaki bağıl nem faktörü. %90'a eşit olduğu varsayılır.

Başlangıçtaki (ilk artıştaki) derz kesme kapasitesi, yalnızca derz açıklığının ve plak kalınlığının bir fonksiyonudur.

$$s_0 = 0.05 h_{pcc} e^{-0.032 J_w} \quad (8.27)$$

s_0 = boyutsuz agreaga derz kesme kapasitesi.

h_{pcc} = portland çimentosu betonu plak kalınlığı, in.

J_w = derz açıklığı

Agrega derz rijitliği, kesme yükü kapasitesinin (S), bir fonksiyonu olarak belirlenir.

$$\text{Log}(J_{AGG}) = -28.4 * e^{-a \left(\frac{S-e}{b} \right)} \quad (8.28)$$

J_{AGG} = mevcut artırma için enine derz üzerindeki derz rijitliği, i.

$$a = 0.35$$

$$b = 0.38$$

S = ilk zaman artışıdaki s_0 'a eşit olan derz kesme kapasitesi.

Agregalar arası kenetlenmeden kaynaklanan yük transfer etkinliği, aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenir:

$$LTE_{AGG} = \frac{100}{1 + 0.012 J_{AGG}^{-0.849}} \quad (8.29)$$

LTE_{AGG} = agregalar arasındaki kenetlenmeden kaynaklanan enine derz üzerindeki yük transfer etkinliği.

J_{AGG} = enine derz rijitliği

Kayma donatısı yük transfer etkinliği (eğer kayma donatısı mevcutsa). Kayma donatısından dolayı bir derzin boyutsuz rijitliği şu eşitlikle elde edilir:

$$J_d = J_d^* + (J_0 - J_d^*) \exp(-DAM_{dowels}) \quad (8.30)$$

J_d = boyutsuz kayma donatısı rijitliği

J_0^* = önceki kayma donatısı rijitliği

$$= 120 \cdot d^2 / h_{pcc}$$

J_d^* = kritik kayma donatısı rijitliği

$$J_d^* = \min \left(118, \max \left(165 \cdot \frac{d^2}{h_{pcc}} - 19.8120, 0.4 \right) \right) \quad (8.31)$$

d = kayma donatısı çapı, in (d > 0.75 in-20 mm)

h_{pcc} = portland çimentosu betonu kalınlığı, in.

DAM_{dowels} = bir derz üzerindeki kayma donatısının taşıdığı gerilmelere ve yük tekrar sayısına göre değişen kümülatif hasar. İlki sıfıra eşittir.

Yük transfer etkinliğinin kayma donatısı bileşeni aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$LTE_{dowel} = \frac{100}{1 + 0.012J_d^{0.849}} \quad (8.32)$$

Temel/Taban Zemini Yük Transfer Etkinliği. LTE_{base} Tablo 8.8’den (bu değerler Tasarım Kılavuzu yazılımında varsayılmıştır) yararlanılarak tespit edilebilir. Bununla birlikte verilen ay için ortalama orta derinlikteki portland çimentosu betonu sıcaklığı 32°F’tan daha küçük ise o zaman LTE_{base} %90’a eşitlenir.

Tablo 8.8: Farklı temel tipleri için varsayılan efektif yük transfer etkinliği [15]

Temel Tipi	Temel Yük Transfer Etkinliği
Agrega temel	20%
Asfalt veya çimento ile iyileştirilmiş temel	30%
Düşük dozajlı beton (grobeton) temel	40%

Agregalar arası kenetlenmenin, kayma donatılarının ve temelin/tabana zemininin katkısı belirlendikten sonra, başlangıçtaki toplam derz yük transfer etkinliği aşağıdaki gibi tespit edilebilir:

$$LTE_{joint} = 100 \left(1 - (1 - LTE_{dowel} / 100)(1 - LTE_{agg} / 100)(1 - LTE_{base} / 100) \right) \quad (8.33)$$

LTE_{joint} = toplam derz yük transfer etkinliği, yüzde.

LTE_{dowel} = sadece kayma donatılarının yük transfer etkinliği mekanizmasını oluşturduğu durumlardaki derz yük transfer etkinliği, yüzde.

LTE_{base} = sadece temelin yük transfer etkinliği mekanizmasını oluşturduğu durumlardaki derz yük transfer etkinliği, yüzde.

LTE_{agg} = sadece agregalar arası kenetlenmenin yük transfer etkinliği mekanizmasını oluşturduğu durumlardaki derz yük transfer etkinliği, yüzde.

7. Adım: Mevcut Maksimum Bozulmanın Belirlenmesi:

Maksimum bozulma; 8.18 denklemi kullanılarak, geçmişteki kümülatif diferansiyel enerji aracılığı ile geçmişteki trafik hasarı için ayarlanır (örneğin; tüm aylar için

dingil yükü uygulamalarından gelen diferansiyel enerji). Geçmiş kümülatif diferansiyel enerji ilk ay için sıfırdır.

8. Adım: Artış İçin Kritik Üstyapı Tepkilerinin Belirlenmesi:

Her bir artış için, her dingil tipi ile dingil yüklemesi için, rijit plağın yüklü ve yüksüz köşelerinde oluşan defleksiyonlar nöral ağ kullanılarak hesap edilir. Bu sapmalar kullanılarak; taban zemini deformasyonunun diferansiyel enerjisi, DE, rijit plak köşesinde oluşan kesme gerilimi τ , ve (kayma donatılı derzler için) maksimum kayma donatısı taşıma gerilmesi (σ_b) hesaplanmaktadır:

$$DE = k/2 (\delta_{loaded}^2 - \delta_{unloaded}^2) \quad (8.34)$$

$$\tau = \frac{AGG * (\delta_{loaded} - \delta_{unloaded})}{h} \quad (8.35)$$

$$\sigma_b = \frac{D_d * (\delta_{loaded} - \delta_{unloaded})}{d * dsp} \quad (8.36)$$

DE = enerji farklılığı, lb/in.

δ_{loaded} = yüklenmiş köşe defleksiyonu, in.

$\delta_{unloaded}$ = yüklenmemiş köşe defleksiyonu, in.

AGG = agregalar arası kenetlenme rijitlik faktörü.

k = taban zemini reaksiyonu katsayısı, psi/in.

D_d = kayma donatısı rijitlik faktörü = $J_d * k * l * dsp$.

d = kayma donatısı çapı, in.

dsp = kayma donatısı aralığı, in.

9. Adım: Kesme Kapasitesindeki Kaybın ve Kayma Donatısı Hasarının Değerlendirilmesi:

Tekrarlı yük uygulamaları nedeniyle kesme kapasite kaybı, (Δs) Portland Çimentosu Birliği (PCA) tarafından geliştirilen yük transfer test verilerinin analizinden elde edilen fonksiyona dayalı olan enine derz genişliği ile karakterize edilmektedir. Aşağıdaki kesme kaybı, zaman artışı sırasında (ay) ortaya çıkar:

$$\Delta s = \begin{cases} 0 & \text{eğer } w < 0.001 h \\ \sum_j \frac{0.005}{1.0 + (jw/h)^{-5.7}} \left(\frac{n_j}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_j}{\tau_{ref}} \right) & \text{eğer } jw < 3.8 h \\ \sum_j \frac{0.068}{1.0 + 6.0 * (jw/h - 3)^{-1.98}} \left(\frac{n_j}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_j}{\tau_{ref}} \right) & \text{eğer } jw > 3.8 h \end{cases} \quad (8.37)$$

n_j = j yük grubu ile mevcut artırma için yük uygulama sayısı

w = derz açıklığı, mils (0.001 in-0.02 mm).

h_{pcc} = portland çimentosu betonu plak kalınlığı, in.

τ_j = j yük grubu için tepki modelinden enine derz üzerindeki kesme gerilmesi.

τ_{ref} = PCA (Portland Cement Association) test sonuçlarından elde edilen referans kesme gerilmesi,

$$\tau_{ref} = 111.1 * \exp(-\exp(0.9988 * \exp(-0.1089 \log J_{AGG}))) \quad (8.38)$$

J_{AGG} = zaman artışı için hesaplanan enine çatlaktaki derz rijitliği.

Bu fonksiyonun kat sayıları; farklı agrega tipleri için değişebilir ama daha önce yapılan test sonuçları, karışımlar arasındaki kesme davranışındaki yorulmanın kaba agregaya bağlı olduğunu göstermiştir.

Kayma donatısı hasarı, DAM_{dow} , aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$DAM_{dow} = C_8 \sum_j \left(\frac{n_j}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_j}{f_c'} \right) \quad (8.39)$$

DAM_{dow} = kayma donatısı-beton arayüzündeki hasar.

C_8 = 400'e eşit olan katsayı.

n_j = j yük grubu ile zaman artışı için yük tekrar sayısı

τ_j = j yük grubu için tepki modelinden enine derz üzerindeki kesme gerilmesi.

f_c' = portland çimentosu betonu basınç dayanımı, psi.

10. Adım: Artışlı Bozulmanın Hesaplanması:

8.17 denklemi kullanılarak, geçerli aydaki gelişen bozulma artışı belirlenir. Artışın büyüklüğü; maksimum bozulma seviyesine, ayın başındaki bozulma seviyesine ve 8pm ve 8am arasında geçen tüm dingil yüklemelerinden kaynaklanan bir aylık sürede oluşan toplam diferansiyel enerjiye, DE, bağlıdır.

11. Adım: Ay Sonundaki Ortalama Derz Bozulmasının Hesaplanması:

8.16 denklemi kullanılarak, mevcut ay sonundaki bozulma belirlenir. Üstyapı tasarım ömrü içindeki aylar için, 6'dan 11. adıma kadar olan aşamalar tekrar edilmelidir.

Bozulma Güvenilirliği

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, %50 güvenilirlik düzeyine sahip olacak sunulan bozulma modeli (8.16'dan 8.19'a kadarki denklemler) ile dizayn edilir. Yani, tasarım ömrü tamamlanmadan başarısızlığa uğranacakmış gibi bir durum söz konusudur. Tasarım amaçları için %50'den daha yüksek güvenilirlik belirlenebilir. Bu koşullarda, arzu edilen güvenilirlik düzeyininin sağlanabilmesi için tahmin edilen bozulmanın daha üst düzeyde ayarlanması gerekir. Verilen bir güvenilirlik seviyesinde tahmin edilen ortalama bozulmayı düzeltmede kullanılan denklemler aşağıda sunulmaktadır:

$$Fault_R = Fault_m + Z_R S_F \quad (8.40)$$

$Fault_R$ = R güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen enine derz bozulması, in.

$Fault_m$ = ortalama enine derz bozulması anlamındaki artımlı değişim (aylık), in.

Z_R = verilmiş R güvenilirlik düzeyi için standart normal sapma.

S_F = tahmin edilen ortalama bozulma düzeyine karşılık gelen standart sapma, in.

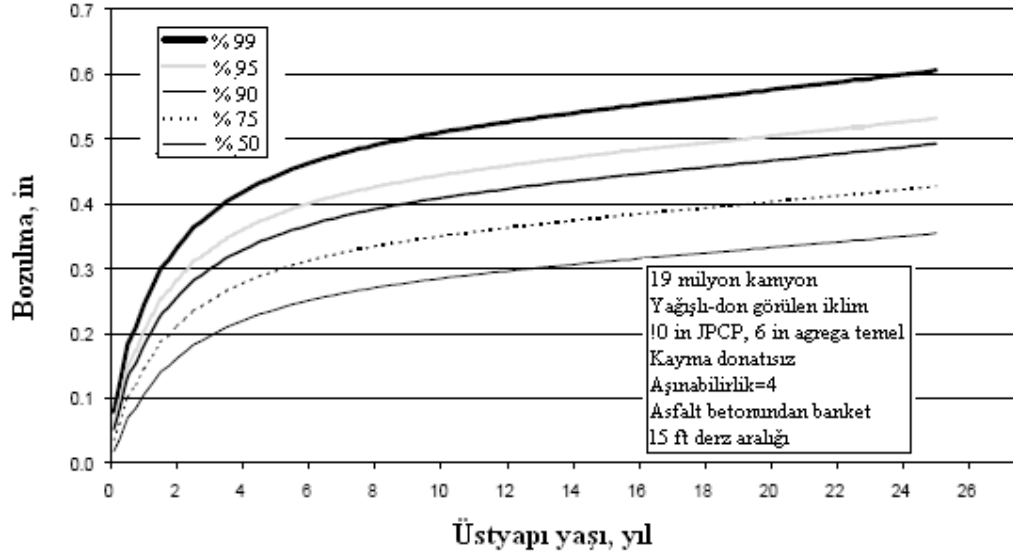
S_F aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$S_F = \sqrt{0.03261 * Fault(t) + 0.00009799} \quad (8.41)$$

$Fault(t)$ = verilmiş herhangi bir t zamanında tahmin edilen ortalama enine derz bozulması.

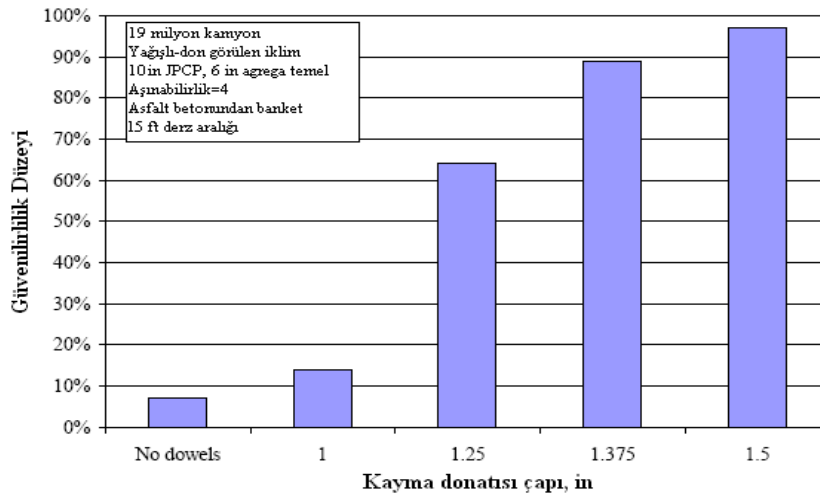
8.41 denklemi yerel kalibrasyona dayalı olarak değiştirebilir.

Şekil 8.31 Güvenilirlik seviyesindeki artışın tahmin edilen bozulmanın artmasına sebep olacağını göstermektedir. Bu; üstyapının, tasarım ömrü sonundaki bozulma performansı kriterini karşılayabilecek şekilde güvenilirlik düzeyinin artırılması için tasarım modifikasyonu anlamına gelmektedir.



Şekil 8.31: Farklı güvenilirlik düzeyleri için tahmin edilen bozulma [15]

Şekil 8.32; kayma donatısı çapının, kırılmanın tanımlanan 0.15 inçlik kırılma limitini aşmayacağı güvenilirlik seviyesi üzerindeki etkisini göstermektedir.

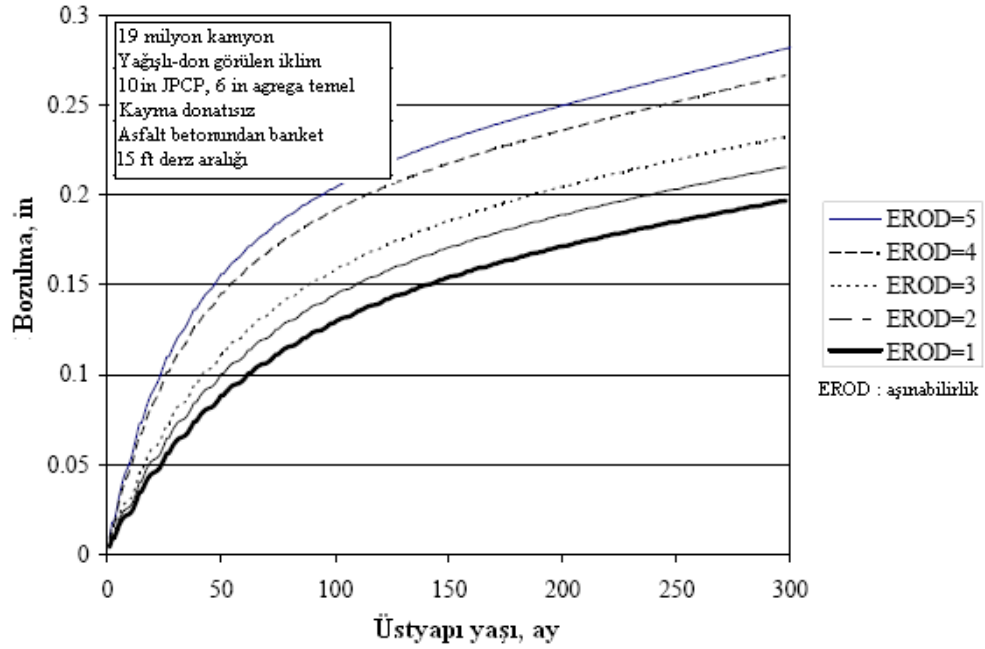


Şekil 8.32: Kayma donatısının güvenilirlik düzeyi üzerindeki etkisi [15]

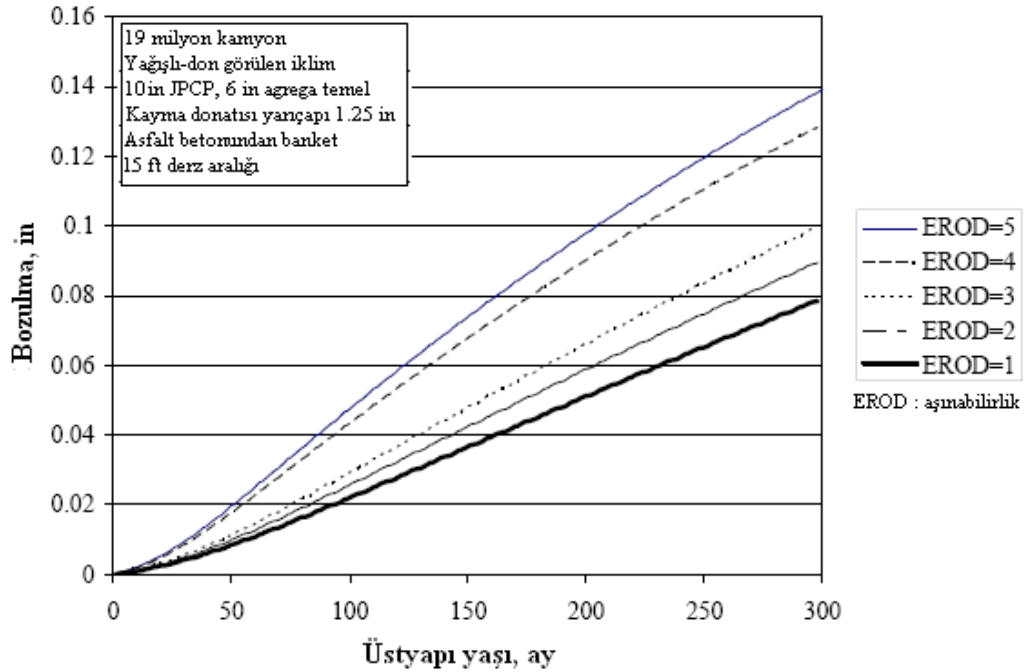
Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılarda Derz Bozulmasını Azaltmak İçin Tasarımın Modifikasyonu

Eğer deneme tasarımı, tasarımcı tarafından seçilen performans kriterlerini karşılayamayan ortalama derz bozulmalarıyla sonuçlanıyorsa, tasarım daha düşük bozulmaya göre modifiye edilebilir.. 8.5.3 başlığında tartışıldığı gibi, farklı tasarım parametreleri farklı performans ölçümleri üzerinde farklı etkilere sahiptir. Tasarım gerekliliklerini tatmin etmek üzere değiştirilen üstyapı tasarımında, tüm uygulanabilir performans göstergeleri konusunda tasarım parametresinin etkileri dikkate alınmalıdır. Bozulmayı azaltmanın en etkin yöntemlerinden bazıları aşağıda listelenmiştir.

- **Kayma donatılarının kullanılması ya da kayma donatısı çapının artırılması.** Uygun ölçülerde kayma donatısı kullanımı derz bozulmalarının kontrolünde en gerek güvenilirlik ve gerekse maliyet açısından en önemli kriterdir. Kayma donatısı çapının çok az artırılması (örneğin 0.25inç) derz kesme rijitliğini önemli miktarda artırır ve ortalama donatı-beton taşıma gerilmesini azaltacak ve böylece Şekil 8.16'da gösterildiği gibi derz bozulmaları azalır. Çalışmalar, yeterli konsolidasyonla uygun şekilde ölçülendirilmiş kayma donatılarının kırılmayı çarpıcı bir şekilde azaltacağını göstermektedir.
- **Temel tabakasını stabilize edilmesi (eğer stabilize edilmeyecekse yoğun gradasyonlu agrega belirtilmiştir) ve açık gradasyonlu temel tabakasının sağlanması.** Stabilize edilmemiş agrega temellerin yeterli miktardaki bitüm veya çimento ile iyileştirilmesi, temel tabakasındaki potansiyel erozyon etkisini azaltmaktadır. Stabilize edilmiş yoğun ve açık gradasyonlu temeller, agrega temellerden daha az aşınabilirliğe sahiptirler. Ayrıntılı bilgiler için için 8.4.9 ve 8.4.10 kısımlarına bakınız. Şekil 8.33 ve 8.34 sırasıyla kayma donatılı ve kayma donatısız üstyapılar için tahmin edilen bozulma konusunda temel tabakasının aşınabilirliğinin etkisini göstermektedir. Eğer kayma donatıları kullanılmamışsa, daha düşük düzeyde aşınabilir olan temel tabakalarının kullanılmasının sonucunda daha düşük düzeyde bozulma beklentisini karşıladığı görülebilir.



Şekil 8.33: Tahmin edilen bozulmada temel aşınabilirliğinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

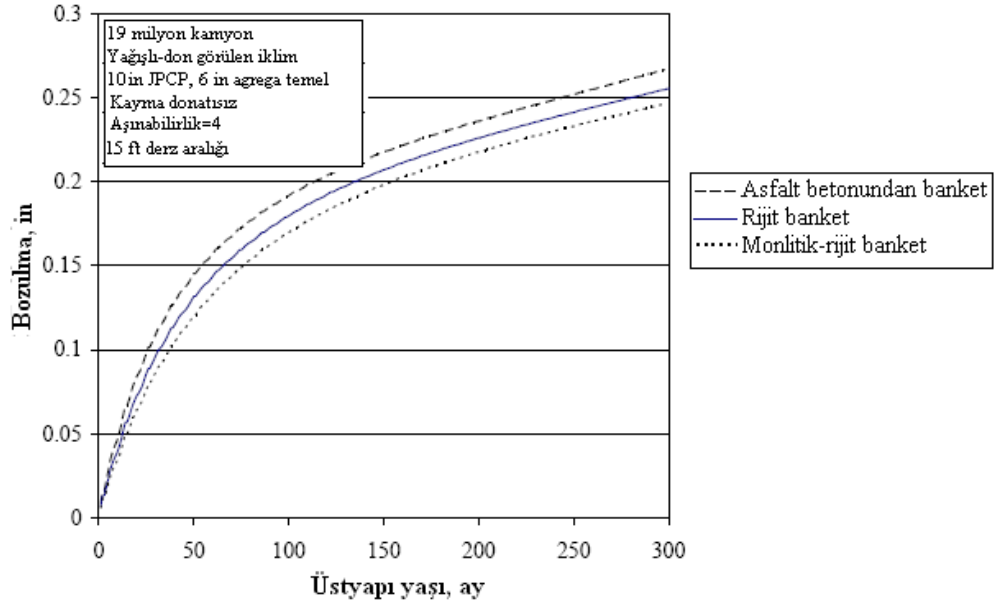


Şekil 8.34: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminleri üzerinde temel aşınabilirliğinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

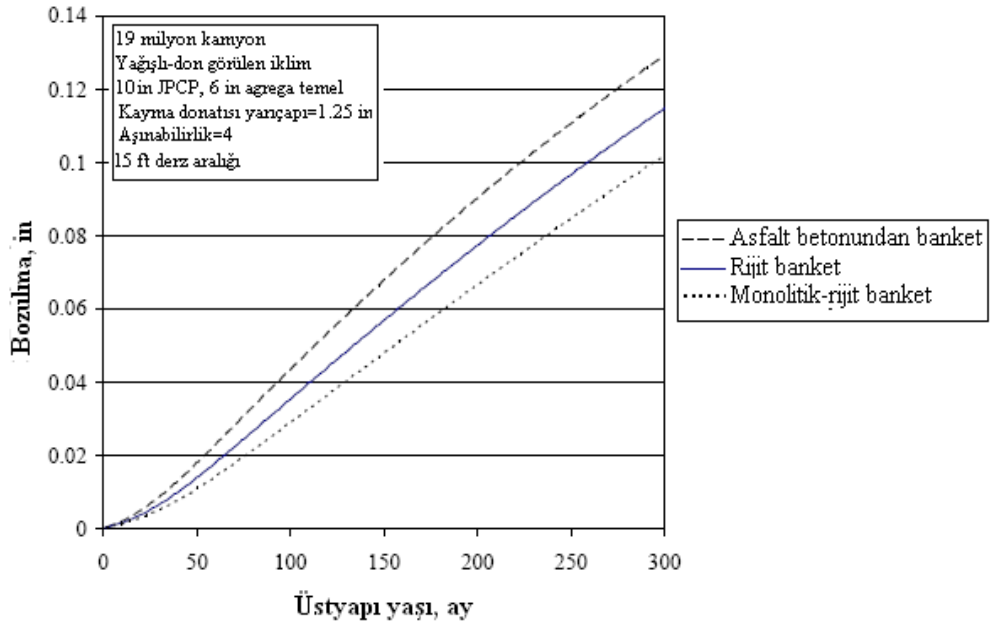
- Rijit bir banketin sağlanması (eğer asfalt betonu banket belirlenmişse).

Bağlanmış rijit banketler, asfalt betonundan banketlere göre daha iyi kenar ve köşe destekliği sağlarlar ve özellikle kayma donatısız üstyapılar için potansiyel erozyon ve

pompaj etkisini düşürürerek plak deflasyonlarını azaltırlar. Şekil 8.35 ve 8.36 sırasıyla kayma donatılı ve kayma donatısız üstyapılarda, banket tipinin bozulma (kırılmayla) üzerindeki etkisini göstermektedir. Ayrıca, banket tipinin rijit plak çatlakları üzerinde de önemli bir etkisi vardır.

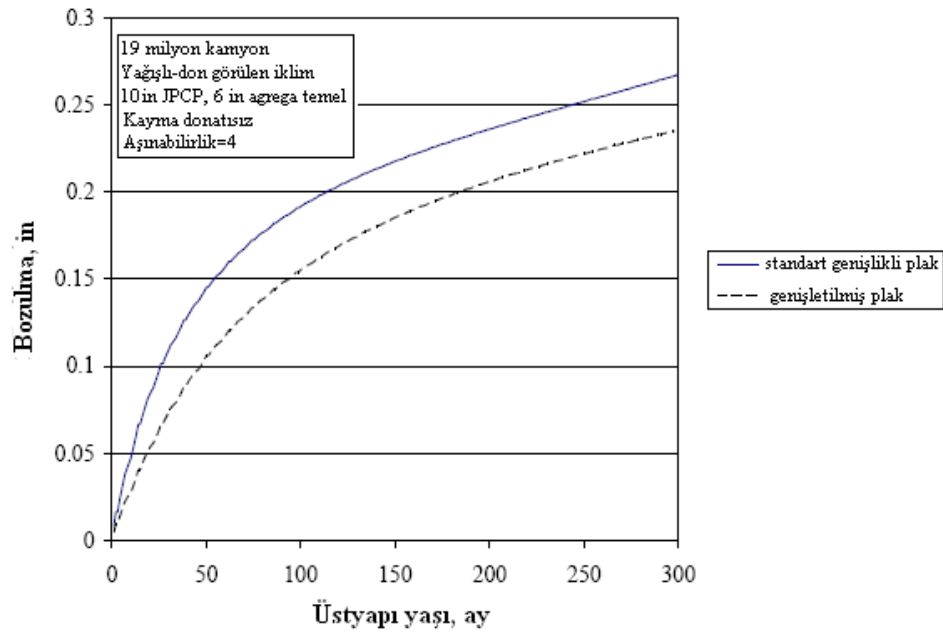


Şekil 8.35: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde banket tipinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

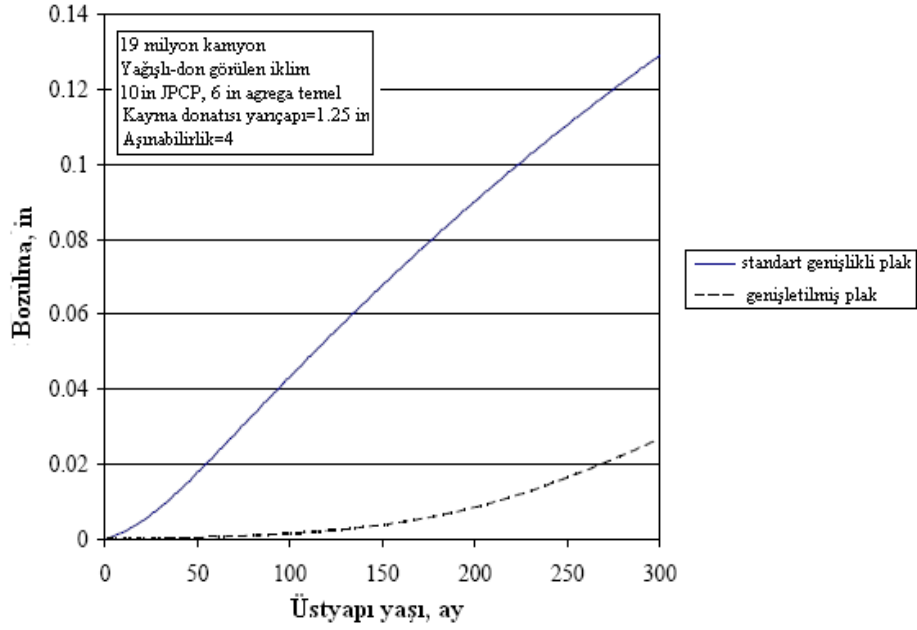


Şekil 8.36: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde banket tipinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

- **2 ft (0.6 m) genişletilmiş trafik şeridi plağı.** Genişletilmiş rijit plak, tekerlek yükünü rijit plak köşelerinden uzaklaştırarak plak defleksiyonlarını ve potansiyel bir erozyon ile pompaj etkisini etkili olarak azaltır. Çalışmalar plak genişletilmesinin kırılmayı azaltabileceğini göstermiştir. Şekil 8.37 ve 8.38 genişletilmiş rijit plak kullanımı durumunda; sırasıyla kayma donatılı ve kayma donatısız üstyapılar için beklenen bozulmayı göstermektedir. Genişletilmiş plakları, çatlama üzerinde de önemli bir etkisi vardır.

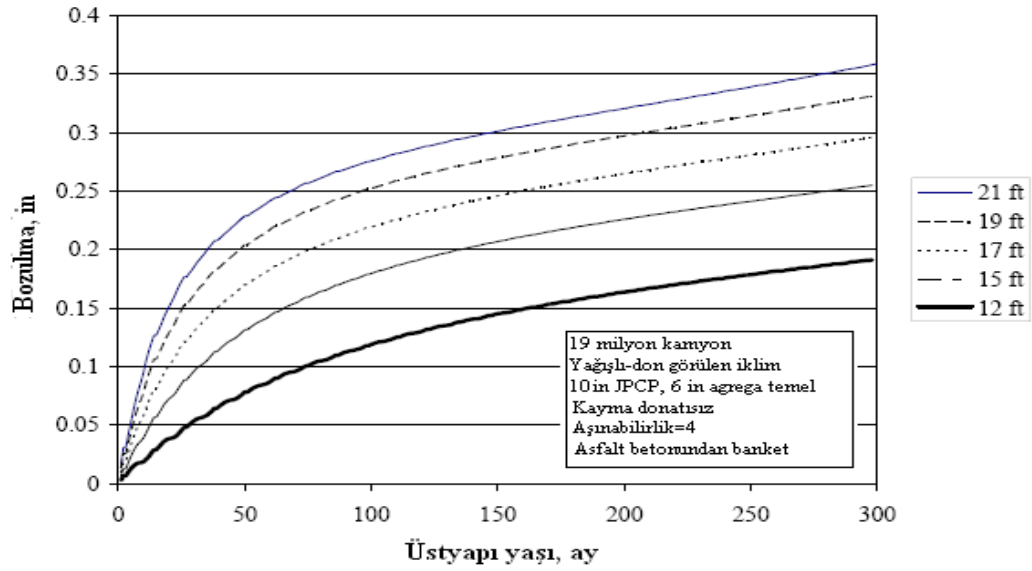


Şekil 8.37: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde plak genişletilmesinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

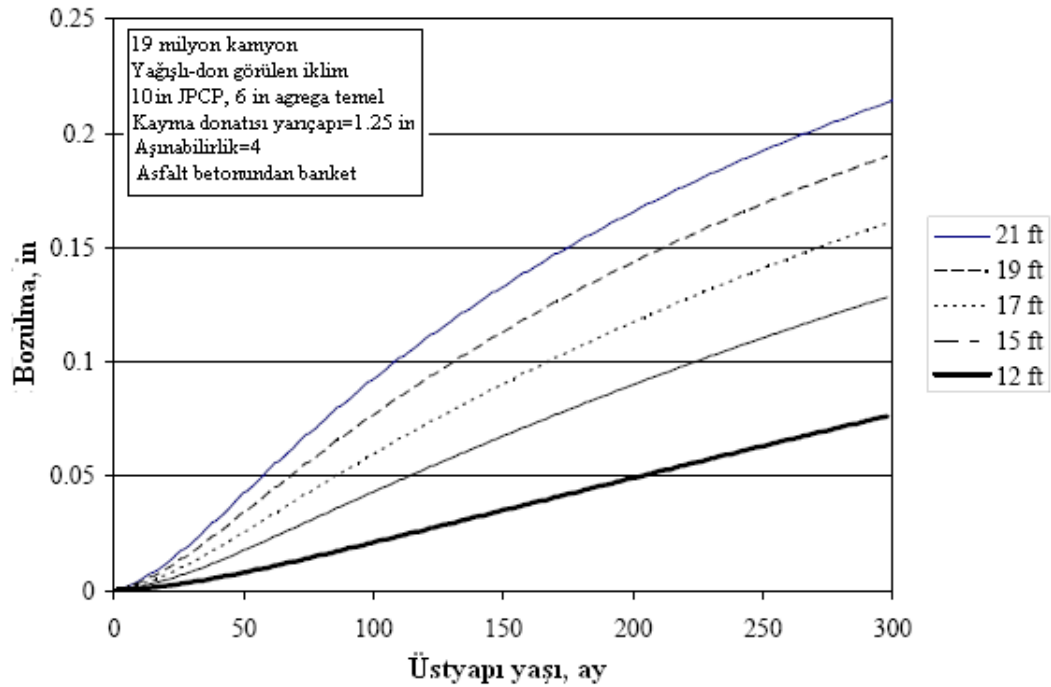


Şekil 8.38: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde plak genişletmesinin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

- **Derz aralığının azaltılması.** Genel olarak söylemek gerekirse derz açıklığının azaltılması derz açıklıklarının küçülmesiyle sonuçlanır. Böylece, agregalar arası kenetlenmenin, daha yüksek derecede yüksek transfer etkisinin iyileştirilmesi konusunda daha yararlı bir etkisi bulunur. Şekil 8.39 ve 8.40 tahmin edilen ortalama derz bozulmasının, kısaltılmış eklem açıklıkları için, daha düşük düzeyde olacağını göstermektedir. Buna rağmen, derz aralığının toplam bozulma üzerindeki etkisi artan sayıdaki derz nedeniyle bir şekilde azalacaktır.



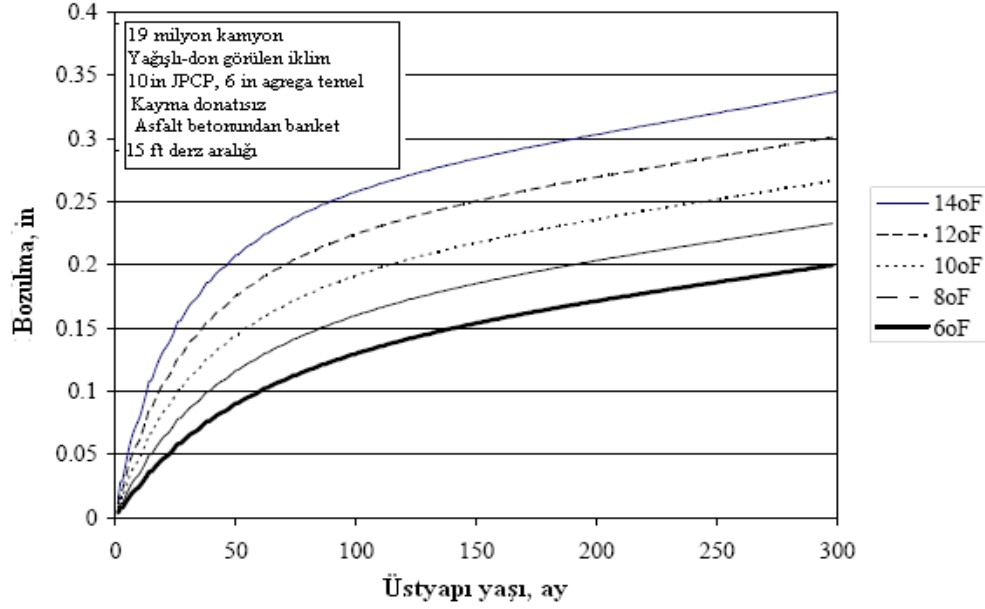
Şekil 8.39: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde derz aralığının etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]



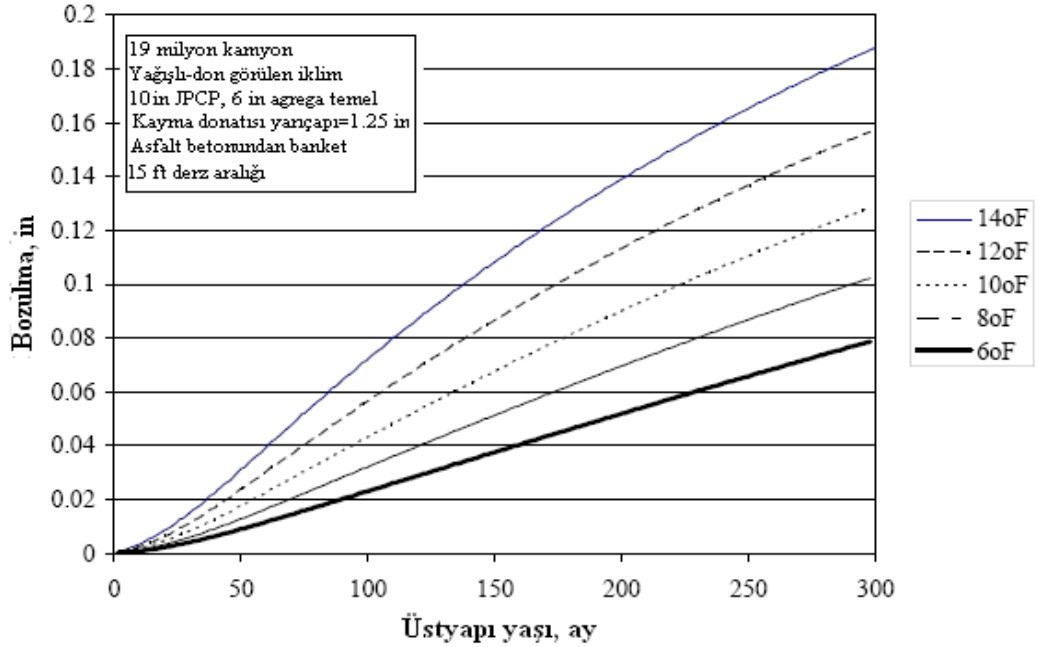
Şekil 8.40: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde derz aralığının etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

- **Kalıcı kıvrılmanın/çarpılmanın azaltılması.** Kalıcı kıvrılma/çarpılma rijit plak altındaki boşlukları artırır ve bunun sonucunda da köşe defleksiyonları artış gösterir. Elverişli kür koşullarına bağlı olarak, eşdeğer sıcaklık gradienti olan -10°F' a karşılık gelen ortalama koşullardan hareketle, kalıcı kıvrılma/çarpılma artabilir yada

azalabilir. Şekil 8.41 ve 8.42; efektif kalıcı kıvrılma/çarpılma sıcaklık gradientindeki azalmanın, sırasıyla kayma donatılı ve kayma donatısız üstyapılar için tahmin edilen ortalama derz bozulmasını azalttığını göstermektedir.

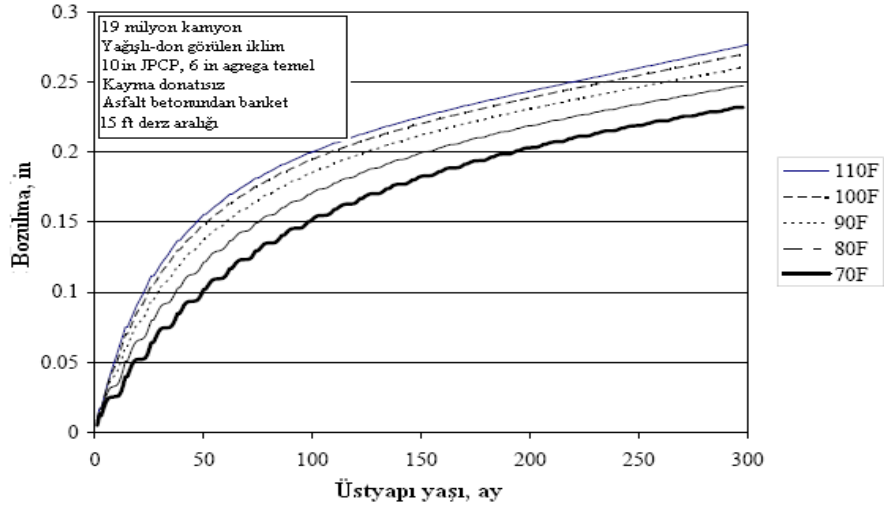


Şekil 8.41: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde kalıcı çarpılmanın/eğrilmenin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

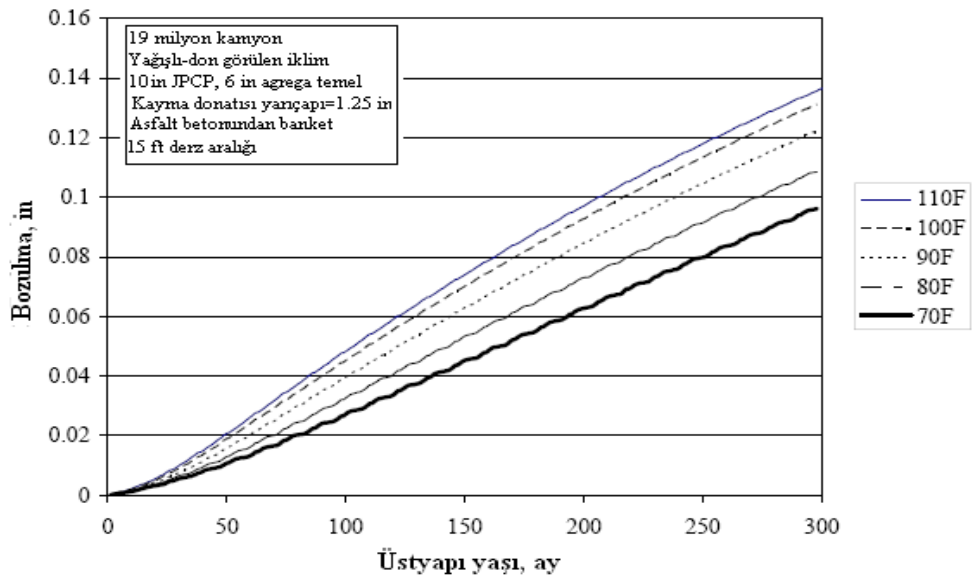


Şekil 8.42: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde kalıcı çarpılmanın/eğrilmenin etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

- **Portland çimentosu betonu sıfır-gerilme sıcaklığının azaltılması.** Sıcak havalardaki kaplama çalışmaları, portland çimentosu betonunun sıfır-gerilme sıcaklığının artışıyla sonuçlanabilir. Bu durum; yüksek düzeyde derz açıklığına, toplam agrega kesme kapasitesi kaybının hızlanmasına ve düşük yük transfer etkinliğine sebep olabilir. Şekil 8.43 ve 8.44 sıfır gerilme sıcaklığındaki düşüşün sırasıyla kayma donatılı ve kayma donatısız rijit üstyapılar için ortalama derz bozulmasını azalttığını göstermektedir.



Şekil 8.43: Kayma donatısız üstyapıların bozulma tahminlerinde sıfır-gerilme sıcaklığının etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]



Şekil 8.44: Kayma donatılı üstyapıların bozulma tahminlerinde sıfır-gerilme sıcaklığının etkisi (%50 lik güvenilirlik) [15]

8.5.5 Performans Tahmini – Düzgünlük

Düzgünlük, karayolu kullanıcıları tarafından derecelendirilen en önemli üstyapı özelliğidir. Bu rehberde, düzgünlük IRI ile tanımlanmaktadır. IRI'nın matematiksel tanımı rehberin birinci bölüm birinci kısmında verilmektedir. Düzgünlük, üstyapının başlangıçtaki inşa-profilinin ve zaman ile trafiğe göre üstyapının boyuna profilindeki herhangi bir değişim kombinasyonunun sonucudur.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için, IRI etkileyen aşırı gerilmeler sonucu ortaya çıkan anahtar bozulmalar, enine derz bozulmasına ve enine çatlamaya da etki etmektedir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için IRI modeli, ampirik bir model kullanarak tahmin edilen derz kabarmalarını da dikkate alır.

IRI Modeli

IRI modeli, kalibre edilip, farklı iklim ve saha koşullarında geçerli sonuçlar üretebilmesini garanti altına almak üzere LTPP ve diğer alan verilerini kullanarak geçerli kılınır. Aşağıdaki nihai olarak kalibre edilmiş modeldir:

$$IRI = IRI_I + C1*CRK + C2*SPALL + C3*TFAULT + C4*SF \quad (8.42)$$

IRI = tahmin edilen IRI, in/mi.

IRI_I = ilk baştaki IRI, in/mi.

CRK = enine çatlaklı (bütün şiddetteki) plak yüzdesi.

SPALL = kabarmış derz (orta ve yüksek şiddetteki) yüzdesi.

TFAULT = her mil için hesaplanmış toplam derz bozulması, in.

C1 = 0.8203

C2 = 0.4417

C3 = 1.4929

C4 = 25.24

SF = saha faktörü

$$= AGE (1+0.5556*FI) (1+P_{200}) * 10^{-6}$$

AGE = üstyapı yaşı, yıl.

FI = donma indeksi, °F-gün

P₂₀₀ = #200 no'lu elekten geçen taban zemini malzemesi yüzdesi

İstatistik modülleri:

$$R^2 = 0.60$$

$$SEE = 27.3 \text{ in/mil (0.4 mm/m)}$$

$$N = 183$$

Enine çatlama ve derz bozulmaları (kırılmaları) bu rehberde açıklanan modelleri (kısım 8.5.3 *Enine Çatlamalar*; ve kısım 8.5.4 *Derz Bozulmaları*) kullanarak elde edilir. Enine derzlerdeki kabarmalar, LTPP ve diğer verileri kullanan aşağıdaki kalibre edilmiş modeli kullanarak belirlenir:

$$SPALL = \left[\frac{AGE}{AGE + 0.01} \right] \left[\frac{100}{1 + 1.005^{(-12 \cdot AGE + SCF)}} \right] \quad (8.43)$$

SPALL = kabarmış derz (orta ve yüksek şiddetteki) yüzdesi.

AGE = yapımdan itibaren üstyapı yaşı, yıl.

SCF = saha koşullarına dayanan ölçeklendirme faktörü-, tasarım-, ve iklimle ilişkili değişkenler:

$$SCF = -1400 + 350 \cdot AIR\% \cdot (0.5 + PREFORM) + 3.4 f'_c \cdot 0.4 - 0.2 (FTCYC \cdot AGE) + 43 h_{PCC} - 536 WC_Ratio \quad (8.44)$$

SCF = formül 8.43'te kullanılan kabarma tahmini ölçek faktörü

AIR% = portland çimentosu betonu hava içeriği, yüzde.

AGE= yapımdan itibaren süre, yıl

PREFORM = derz dolgu malzemesi varsa 1; yoksa 0.

f'_c = portland çimentosu betonu çekme dayanımı, psi

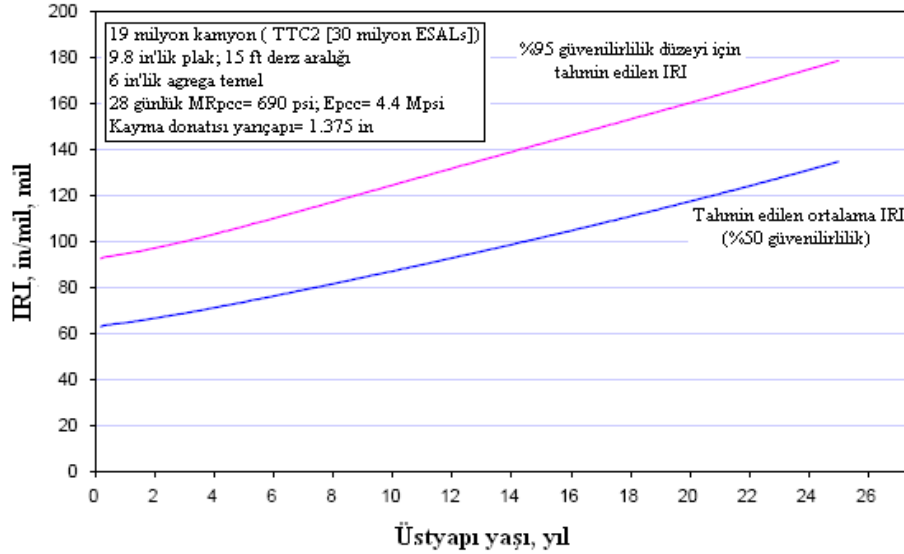
FTCYC = yıllık ortalama donma-çözülme döngüsü sayısı.

h_{pcc} = portland çimentosu betonu plak kalınlığı, in.

WC_Ratio = portland çimentosu betonu su/çimento oranı.

İstatistikler: R² = %78 , N = 179, SEE = derzlerin % 6.8 'i.

Don bölgelerinde, derz kabarmasının azaltılması; uygun sürüklenmiş hava içeriği ve arttırılmış beton dayanımı ile elde edilebilir. 8.42 denkleminde verilen IRI tahminleme modeli 183 LTPP üstyapı kesiminin saha performansına dayalıdır. IRI modeliyle verilen tahmin örneği şekil 8.45 te gösterilmektedir.



Şekil 8.45: Tasarım ömrü boyunca tahmin edilen IRI (ilk IRI=63in/mi) [15]

IRI Tahmin Prosedürü:

IRI tahmini, çatlama ve kırılma tahminleri tamamlandıktan sonra oldukça basittir. IRI tahmini için adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Adım: Enine çatlamanın ve derz bozulmalarının tahmini:

- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlama tahmini için 8.5.3 başlığı altındaki adımlar izlenir.
- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda derz bozulmalarının (kırılmalarının) tahmini için 8.5.4 başlığı altındaki adımlar izlenir.

2. Adım: Derz kabarmasının tahmini:

Derz kabarmasının tespiti için 8.43 denkleminde verilen ampirik modeli kullanılır.

3. Adım: Başlangıçtaki IRI'nın seçimi ve IRI'nın tahmini:

Başlangıçtaki IRI proje düzgünlük spesifikasyonlarına dayanır. Başlangıç IRI'nın tipik değerleri 50'den 100 inç/mi' e kadar değişim gösterir. Başlangıçtaki IRI seçilir ve proje süresince IRI'yı tahmini için 8.42 denkleminde verilen IRI modeli kullanılır.

IRI Güvenilirliği:

Güvenilirlik tasarımı arzu edilen güvenilirlik seviyesinde tahmin edilen IRI'nın belirlenmesiyle aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} IRI_P &= IRI + STD_{IRI} \cdot Z_P \\ IRI_P &\leq 100 \% \end{aligned} \quad (8.45)$$

IRI_P = P güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen IRI, in/mi.

IRI = ortalama girdilere (%50 güvenilirlik düzeyine karşılık) dayalı olarak tahmin edilen IRI, in/mi.

STD_{IRI} = ortalama IRI'nin tahmin edilen düzeydeki standart sapması.

Z_P = standart normal sapma.

$$STD_{IRI} = \left(Var_{IRI} + C1^3 \cdot Var_{CRK} + C2^3 \cdot Var_{Spall} + C3^3 \cdot Var_{Fault} + S_e^3 \right)^{0.5} \quad (8.46)$$

STD_{IRI} = ortalama IRI'nin tahmin edilen düzeydeki standart sapması.

Var_{IRI} = ilk baştaki IRI'nin (LTTP'den elde edilen) varyansı = $29.16 \text{ (in/mi)}^2 - (0.007 \text{ (mm/m)}^2)$.

Var_{CRK} = çatlak varyansı [formül 8.15], (plak yüzdesi)².

Var_{Spall} = kabarma varyansı (kabarma modelinden elde edilen) = $46.24, \text{ (derz yüzdesi)}^2$

Var_{Fault} = bozulma varyansı [eşitlik 8.41], $(\text{in/mi})^2$

S_e^2 = tüm model hata varyansı = $745.3 \text{ (in/mi)}^2 - (0.18 \text{ ((mm/m)}^2)$.

Düzgünlüğün Geliştirilmesi İçin Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapı Tasarımının Modifikasyonu:

Deneme tasarımı, tasarımcı tarafından seçilen performans kriterlerini karşılamayan bir IRI ürettiğinde, deneme tasarımı daha düşük bir IRI'ya göre modifiye edilir. Farklı girdi parametrelerine göre IRI'nın duyarlılığı şekil 8.46'da gösterilmektedir. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda, düzgünlüğü etkileyen en hassas faktör derz bozulmaları olup derz bozulmalarını etkileyen en kritik faktör de kayma donatısı çapıdır. Şekil 8.47 derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda düzgünlüğün, kayma donatısı çapına göre hassasiyetini göstermektedir. Derzli donatısız tipteki rijit

üstyapılarda düzgünlük; üstyapının düzgün inşa edilmesi, aşırı gerilmeler sonucu oluşan özellikle derz bozulmalarının limitlendirilmesi ile iyileştirilebilir. Bunu başarmanın en etkili yöntemlerinden bazıları aşağıdaki gibidir:

- **Üstyapının çok düzgün inşa edilmesi.** Düzgün bir üstyapı inşasına yönelik önemli teşvikler öneren pürüzsüzlük spesifikasyonları pek çok eyalette standarttır. Bu spesifikasyonlar, uzun uygulama yıllarını kapsayan bir süreçte, ortalama IRI'yi azaltan oldukça çarpıcı etkilere sahiptir. Böylece çok pürüzsüz bir üstyapının inşa edilebileceği artık iyice bilinmektedir. Bu durum sürücüye uzun yıllar hizmet edecek pürüzsüz bir üstyapı sağlayacaktır.

- **Kayma donatılarının dâhil edilmesi ya da kayma donatısı çapının arttırılması.** Uygun şekilde ölçeklenmiş kayma donatılarının kullanımı derz bozulmalarının kontrolü için genellikle en güvenilir ve en düşük maliyetli yöntemdir. Kayma donatılarının ve kayma donatısı çapının derz bozulmaları üzerindeki etkisi konusundaki tartışmalar için 8.5.4 kısmına bakınız.

- **İyileştirilmiş bir temel tabakasının kullanımı.** (Stabilize edilmemiş yoğun gradasyonlu agrega verilmiş ise). Stabilize olmayan bir agrega temel tabakasının bitüm yada çimento ile stabilize edilmesi, temel tabakasının erozyon potansiyelini azaltacaktır. Çalışmalar, temel tabakasının iyi bir şekilde iyileştirilmesinin bozulmayı (kırılmayı) %50 civarında azaltabileceğini göstermektedir. İyileştirilmiş temel tabakasının kullanımı çatlamada da azalmalara neden olur. Çatlama konusunda zemin tipinin etkileriyle ilgili tartışma için 8.5.3 kısmına ve kırılma konusundaki etkiler için 8.5.4 kısmına bakınız.

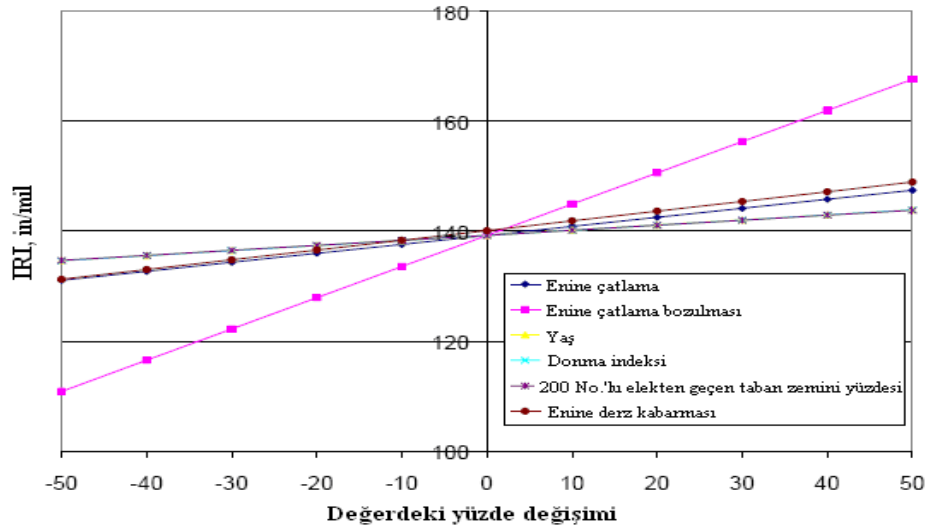
- **2 Ft'e (0.6 m) ölçüsünde genişletilen rijit plak.** Çalışmalar, plak genişletilmesinin kırılmayı %50 oranında azalttığını göstermektedir. Rijit plağın genişletilmesi; tekerlek yüklerini rijit plağın boyuna serbest ayrıtından uzaklaştırmakta, böylece, kritik eğilme gerilmesini ve enine çatlama potansiyelini büyük oranda düşürmektedir. Çatlama konusunda rijit plak genişletilmesinin etkilerinin tartışması için 8.5.3 kısmına ve kırılma konusundaki etkileri için 8.5.4 kısmına bakınız.

- **Derz aralığının azaltılması.** Derz aralığının azaltılması üstyapının düzgünlüğünü doğrudan etkileyen çatlama ve kırılmaların azaltılmasının en etkin araçlarıdır.

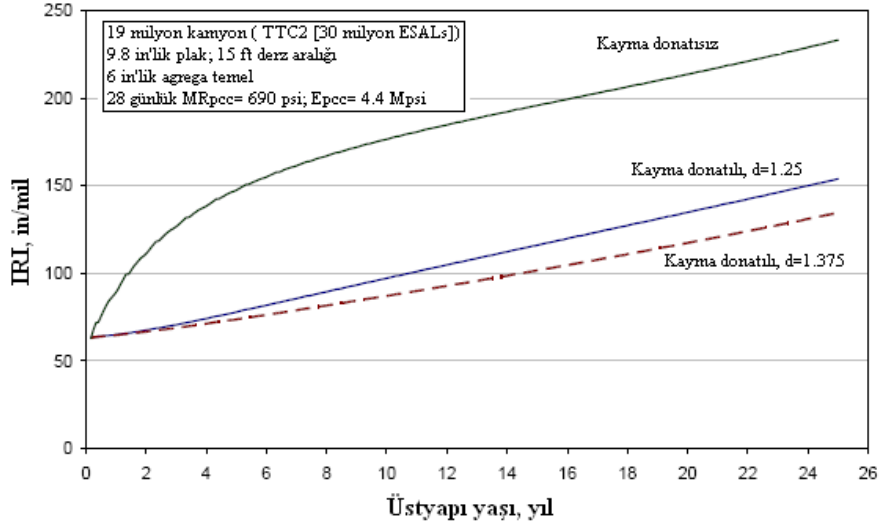
Çatlama konusunda derz aralığının etkileriyle ilgili tartışmalar için 8.5.3 kısmına ve kırılma konusundaki etkiler ile ilgili 8.5.4 kısmına bakınız.

- **Rijit plak kalınlığının artırılması.** Rijit plak kalınlığı, plak çatlağını önemli ölçüde ve kırılmayı daha az ölçüde etkilemektedir. Bazı kalınlıklarda, buna rağmen, azalan verim noktasına ulaşıp yorulma çatlaması daha fazla oluşmaz. Böylece, pürüzsüzlük performansı plak kalınlığı artırılarak (plak çatlamaları azaltılarak) belirli bir dereceye kadar geliştirilebilir ama kırılmayı doğrudan etkileyen söz konusu diğer faktörlerin etkisi daha büyüktür. Çatlama konusunda plak kalınlığının etkileriyle ilgili tartışma için 8.5.3 kısmına ve kırılmanın etkileri için 8.5.4 kısmına bakınız.

- **Portland çimentosu betonunun uygun sürüklenmiş hava içeriğine sahip olmasının garanti altına alınması.** Don bölgelerinde, uygun sürüklenmiş hava içeriğine sahip portland çimentosu betonu karışımlarında çok daha az derz kabarması görülür.



Şekil 8.46: Üstyapıda aşırı gerilmeler sonucu oluşan anahtar bozukluklar ve saha değişkenlerinin derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki etkileri [15]



Şekil 8.47: Kayma donatısının derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki ekileri [15]

8.6 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Değerlendirmeleri

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı çok sayıda faktöre bağlıdır ve tasarım çözümleri herhangi bir anlamda tek değildir. Tasarım amaçları farklı kombinasyonlardaki tasarım özellikleri kullanılarak başarılabılır. Çeşitli tasarım özellikleri aynı zamanda üstyapı performansını arttırmak ve yetersiz performans riskini azaltmak için kullanılabilir. Örneğin, arttırılan donatı içeriği tasarım süresince sıkı çatlakları garanti edecektir. Dayanımın ve alt-temel destekliğinin geliştirilmesi ile ilgili olan zayıf veya değişken taban zemini koşullarının olduğu yerlerde stabilize bir temel tabakası veya bir agrega alt-temel kullanılabilir. Yüksek hacimli ağır kamyon trafiği için tasarlanan üstyapı ayrıtı boyunca erozyon riskinin azaltılması konusunda önemli bir kalite sağlayan tasarlanmış bir stabilize temel erozyona karşı daha dirençlidir. Uzun tasarım periyotları için (örneğin 50 yıl), yüzey altı drenaj; yeterince uzun dönemli malzeme performansını garanti altına alınmasında önemli olabilmektedir. Tasarım koşullarının dikkatlice değerlendirilmesi ve mevcut seçeneklerin irdelenmesi optimal tasarımların elde edilmesinde önemlidir. Bu kısım sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımında dikkate alınması gereken faktörlerin tartışılmasına olanak sağlar.

8.6.1 Plak Kalınlığı

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda; plak kalınlığı, hem performans hem de plak rijitliği açısından tasarım faktörüdür. Genel olarak plak kalınlığı arttıkça, plağın enine derzler boyunca yük transfer edebilme yeterliliğinde olduğu gibi, kritik eğilme gerilmelerine karşı olan direnç kapasitesi de artar. Sonuç olarak, plak kalınlığı arttıkça, zımbalama etkisi azalıp pürüzsüzlük artış gösterir .

Plak kalınlığı; çatlak aralığı, enine çatlak genişliği, kullanılan donatı yüzdesi, portland çimentosu betonu karışım özellikleri ve temel tipi ile rijitliğini de içeren diğer tasarım özellikleri kapsamında seçilmelidir. Yapım sırasındaki hava koşulları da dikkate alınmalıdır. Diğer bir deyişle, yapım koşullarına dayalı olarak, verilmiş olan bir grup tasarım özellikleri için yeterli olan plak kalınlığı diğer bir grup tasarım özellikleri için yeterli olamayabilmektedir. Amaç, tasarım periyodu boyunca arzu edilen güvenilirlik seviyesindeki; agregalar arası kenetlenme yorulmasının, zımbalama etkisi gelişiminin ve düzgünlüğün kabul edilebilir seviyelerde sağlanabilmesidir.

8.6.2 Enine Çatlak Genişliği ve Aralığı

Enine çatlak genişliği, enine derzde sağlanan yük transfer kapasitesini kontrol etme de dominant bir rol oynadığı ve istenen tasarım donatı içeriğini belirlemede kullanıldığı şekilde sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansına olan bakış açılarının pek çoğunun temelini oluşturur. Daha küçük çatlak genişlikleri, genellikle; birbirine komşu plak segmentleri arasındaki tekrarlı kesme gerilmelerinin transferi için çatlak kapasitesini artırır. Daha geniş çatlaklar, genellikle; plağın üstünde artan yük ile ilişkili artan çekme gerilmeleri, bunu izleyen artan yorulma hasarını ve hemen ardından boyuna çatlak ve zımbalama etkisiyle sonuçlanan zamanla ve trafikle gittikçe düşüş gösteren yük transfer etkinliğini sergiler.

Proje boyunca ortalama mevsimsel (aylık) çatlak genişliği, tasarımda ve tahmin edilen tüm ortalama girdilerde doğrudan doğruya dikkate alınmaktadır. Şüphesiz çatlak genişlikleri proje süresince büyük değişim gösterir. Bu anda, sözü edilen değişimler, sadece kalibrasyon süreçlerin boyunca dolaylı olarak dikkate alınmaktadır. Barizdir ki, zaman içinde kırılma gösterecek çatlakların her ne sebeple olursa ortalama çatlaklardan daha geniş olanlara doğru yönelim göstermesi kaçınılmazdır. Çatlak genişliği, buz çözücü tuzların kullanıldığı bölgelerde

önemlidir. Bu alanlarda çatlak genişliklerinin, donatıların korozyonunu mümkün olduğunca minimize etmek için çok sık aralıklarla bakıma alınması gereklidir. Saha çalışmaları uzun çatlak aralığının daha geniş enine çatlak açıklıkları için potansiyeli arttırdığını göstermektedir.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımında çatlak aralığı; minimum ve maksimum değerler arasında tutulmaya çalışılır. İnşanın yapıldığı iklimin ve diğer faktörlerin çatlak aralığı üzerindeki büyük etkisi nedeniyle bunun sağlanabilmesi oldukça güçtür. Bu prosedür, zımbalama etkisi gelişimi ile direkt ilişkili olarak daha etkili bir tasarım kriteri olduğuna inanılan çatlak genişliği üzerine daha çok odaklanmıştır. Donatı derinliğindeki çatlak genişliğinin 0.02 inç (veya tasarımcı tarafından seçilem diğer değerler) ile sınırlandırılması, ortalama çatlak aralığını makul bir düzeye indirdiği ve kontrol altına aldığı belirlenmiştir. Tavsiye edilen maksimum ortalama çatlak aralığı 6 ft (1.8 m) dir. Uygun donatı yüzdesinin, portland çimentosu betonunun karışım parametrelerinin ve temel tipi ile sürtünmenin tasarımcı tarafından doğru şekilde seçilmesi ile kabul edilebilir çatlak aralığı ve genişliği elde edilebilir. Bu durum 8.6.6'da açıklandığı gibi yük transfer etkinliği kaybını minimize edecektir.

8.6.3 Portland Çimentosu Betonu Malzemeleri

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımında ve inşasında, portland çimentosu betonunun malzeme özellikleri; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme gerilmesi, termal genleşme katsayısı, termal yayılma gücü, hidrasyon ısı, elastisite modülü, maksimum rötre ve agrega tipini kapsayacak şekilde dikkate alınır. Tasarım rehberinde, BÖLÜM 2, kısım 2; sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım prosedürüne ampirik olarak dahil edilen hidrasyon ısı ve termal yayılma gücü dışındaki bu girdileri irdelemektedir.

Verilen bir portland çimentosu karışımı için daha yüksek basınç dayanımı daha yüksek elastisite modülü anlamına gelir. Portland çimentosu betonu dayanımının artışı, genellikle, daha uzun yorulma ömrüyle sonuçlanır. Bununla birlikte, dayanımdaki artışın sonucu elastik modüldeki artışla beraber gelen yorulma ömründeki artış, daha geniş çatlak genişliği ve daha düşük yük transferine sebep olan çatlak aralığındaki artış kadar genellikle inanıldığı gibi etkili olmayabilmektedir.

Daha yüksek bir sıfır-gerilme sıcaklığı; arttırılmış çimento içeriğinden dolayı, daha yüksek portland çimentosu betonu dayanımının olası sonuçlarındandır. Bununla birlikte, kuruma rötresi de çimento içeriği ile birlikte sıkça artış gösterir. Sıfır-gerilme sıcaklığı betonun yerleştirildiği sıcaklıkla ve çimentonun hidrasyon ısısı ile ilgilidir. Hidrasyon ısısı; solar radyasyonun, çimento kompozisyonunun ve inceliğinin, mineral katkıların ve kimyasal katkıların (örneğin, geciktirici ve hızlandırıcı katkılar) bir fonksiyonudur.

Kaba agregaların termal genleşme katsayısının (α_{PCC}), çatlak aralığı ve çatlak genişliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Daha yüksek α_{PCC} ; daha uzun çatlak aralığı ve daha büyük çatlak genişliği anlamına gelir. Termal genleşme katsayısı arttığında zımbalama etkisinin artmasına yol açan termal kıvrılma gerilmelerini artırır. Arttırılmış çimento içeriğiyle elde edilen daha yüksek portland çimentosu betonu dayanımı portland çimentosu betonunun termal genleşme katsayısını etkili bir şekilde arttırmaktadır.

Aşağıda sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı konusunda portland çimentosu betonunun çeşitli özelliklerinin etkisinin bir özeti verilmektedir:

- Portland çimentosu betonu dayanımı. dayanımın artırılması sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansını geliştirir ama daha yüksek çimento içeriği ile elde edilen daha yüksek dayanıma yararlı etkiyi azaltan; daha yüksek modül, daha yüksek rötire ve daha yüksek termal genleşme katsayısı (α_{PCC}) eşlik eder.
- Portland çimentosu betonu modülü – daha düşük düzeydeki modül, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı için daha iyidir.
- Rötire- daha düşük düzeydeki rötire, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı için daha iyidir.
- Termal genleşme katsayısı – daha düşük düzeydeki katsayı, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı için daha iyidir.

Portland çimentosu betonunun çoğu özellikleri yerel malzemenin kullanımıyla belirlenir ve tasarımcının mukavemet dışındaki karışım özellikleri üzerinde çok az bir kontrolü söz konusudur. Buna rağmen üstyapı performansı için portland çimentosu betonu karışımının optimize edilmesi mümkündür ve karışım

optimizasyonu bazı projelerde rahatlıkla uygulanabilir. Bazı portland çimentosu betonu özellikleri üstyapı performansına olduğu kadar malzeme maliyetini de etkiler.

8.6.4 Boyuna Donatı

Enine çatlak açıklıklarını denetlemek için kullanıldığından dolayı, boyuna donatı, önemli bir tasarım parametresidir. Çatlak aralığı üzerindeki etkisi açısından da kritiktir. Çatlak aralığının azaltılması tamamıyla donatı yüzdesinin arttırılmasıyla ilgilidir. Birleşik Devletlerde, %60 ile %80 (daha soğuk iklim şartlarında) donatı yüzdeleri, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı sistemlerinde uygun bir çatlama örneği ve performansı sunmuştur. Saha çalışmaları, artan donatı içeriğinin daha düşük düzeyde zımbalama etkisi ve artan yüzey pürüzsüzlüğüyle sonuçlanmaktadır. Bundan dolayı, tasarımdaki donatı içeriği etkisinin dikkate alınması önem kazanmaktadır.

Donatı içeriği; donatı çapı, plak kalınlığı, kabul edilebilir maksimum çatlak genişliği, portland çimentosu betonu malzeme özellikleri, temel tipi ile rijitliği ve bölgesel iklimsel karakteristikleri de içeren çok sayıdaki diğer tasarım özelliklerinin de dikkate alınmasıyla belirlenebilir. Diğer bir deyişle donatının belirlenen oranı, özellikle kaba agrega tipleri dikkate alındığında verilen bir tasarım özelliği grubuna uygun olan yüzdelere diğer bir tasarım özelliği grubu için yetersiz kalabilir. Amaç, tasarım süresince arzu edilen güvenilirlik seviyesinde, zımbalama etkisi artışına direnç gösteren ve tüm projedeki kabul edilebilir enine çatlak genişliğini sağlayan donatı içeriğini seçmektir. Tasarımda; proje bütününde çatlak genişliğindeki değişkenlik yada istisnai genişlikler içeren lokalize çatlakların ağır trafik koşullarında çok hızlı bir şekilde başarısızlıkla sonuçlanabileceği dikkate alınmalıdır. Bu tür çatlaklar, sıklıkla inşaatın sonraki birkaç gün içindeki oluşan ilk çatlaklardır.

8.6.5 Boyuna Donatı Derinliği

Spesifikasyonların çoğu, donatının plağın orta-derinliğine (veya hemen üstüne) yerleştirilmesini gerektirmektedir. Bununla birlikte, yapılan çalışmalarda; donatının yüzeye daha yakın bir şekilde yerleştirildiği durumlarda, daha kısa çatlak aralıklarına bağlı olarak daha sıkı çatlaklar ve daha az zımbalama etkisi gözlemlenmiştir. Örneğin, Illinois eyaletinde donatı, plak kalınlığını dikkate almaksızın donatı plak yüzeyinin 3.5 inç (9 cm) altına yerleştirilmektedir ve bunun sonucunda üstyapı yüzeyinde çok yakın çatlaklar gözlemlenmiştir. Buna karşın,

donatının yüzeye aşırı derecede yakın yerleştirilmesi, inşa problemlerine neden olabilir. Donatı derinliği için; yüzeyin minimum 3.5 inç (9cm) altı ve maksimum plağın orta-derinliği tavsiye edilmektedir. Bu tasarım kılavuzu, çift-sıralı donatı kullanımını dikkate almaz.

8.6.6 Enine Çatlaklarda Yük Transfer Etkinliği

Enine çatlakların yük transferi, boyuna çatlamlar ile ilgili olan zımbalama etkisinin gelişimini kontrol altında tutan kritik bir faktördür. Saha çalışmaları, küçük çatlak genişlikli ve birbirine yakın olan enine çatlak örneklerinin, yekpare kilitlemenin aşınmasına yüksek direnç gösteren küçük çatlak genişliklerinin agregalar arasındaki kenetlenmenin zayıflama davranışını iyileştirdiğini göstermiştir. %95 veya daha büyük bir yüzdedeki yük transfer iyileştirmesi tasarım ömrü boyunca agregalar arası kenetlenmeyi maksimize edecektir ve aşırı yüklemelerden kaynaklanan zımbalama etkisiyle gelen bozulmaların sınırlandırılmasını sağlayacaktır.

Çatlak yük transfer etkinliği; plak kalınlığı, donatı yüzdesi, çatlak genişliği, çatlak genişliği, çatlak aralığı, portland çimentosu betonu malzeme özellikleri, kaba agrega gradasyonu ve temel tipi ile rijitliğini içeren tasarım özellikleriyle kontrol edilebilir. Amaç, %95 yada daha büyük yüzdedeki çatlak yük transferi sağlayan, çatlak aralığını ve plak kalınlığının seçilmesidir. %95'in üzerindeki yük transfer etkinliğinin bakımı, tasarım ömrü boyunca arzu edilen güvenilirlik seviyesinde kabul edilebilir düzeydeki zımbalama etkisini ve pürüzsüzlüğü sağlamaktadır.

8.6.7 Plak Genişliği

Plak genişliği, şerit genişliğiyle (genellikle 12ft) eş anlamlıdır. Birleşik Devletlerdeki ve yabancı ülkelerdeki birkaç proje, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, performansın artırılması için daha geniş plaklarla (genellikle 14 ft'lik (4.2 m)) inşa edilmektedir. Saha ve analitik çalışmalar, daha geniş plakların; kamyon dingil yüklerinin ayrıttan uzak tutulmasını sağladığını, plak yüzeyindeki eğilme gerilmesini ve çoğunlukla üstyapı sınırında meydana gelen zımbalama etkisinden dolayı gözlemlenen defleksiyonları büyük oranda azalttığını göstermektedir. Bu tasarım prosedürü, genişletilmiş plaklı sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılara doğrudan doğruya atıfta bulunmaz. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların serbest ayrıttında daha hafif yükleri gösteren arttırılmış yanal öteleme girdisi ile dolaylı bir yaklaşım sunulmuştur. Tekerleğin şerit-şerit derzinde kritik hale geliyor olmasından dolayı

maksimum 30 inçlik mesafe önerilmektedir. Kesinlikle, geleneksel kalınlıktaki plaklar için tasarım, genişletilmiş plaklı sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için kabul edilebilir olacaktır. Plak genişletildiğinde, aşağıdan-yukarıya zımbalama etkisine sebep olacak daha içteki aşırı yüksek dingil yükünün altındaki plak yüzeyindeki plak gerilmelerinin olduğu yerlerde başarısızlık modu tamamiyle değişecektir. Daha ayrıntılı araştırma ve geliştirme, bu şartları doğrudan doğruya yönetebilmek adına gereklidir.

8.6.8 Enine Donatı

Enine donatıya, inşaat sırasında boyuna donatı çubuklarının sadece sabitlenmesi için gerek duyulur. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki çatlama örneklerinde enine donatının etkileri bu rehberde doğrudan doğruya dikkate alınmamaktadır ama saha çalışmaları, özellikle donatının çift sıralı olarak yerleştirildiği durumlarda, enine çatlamanın görüldüğü yerlerin enine donatı ile çakışma gösterdiğini ortaya koymuştur. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıları kullanan çoğu kuruluş, şerit-şerit derzlerinden veya karayolu boyunca meydana gelen oturmalarından kaynaklanan boyuna çatlakları kontrol altına alabilecek standart enine donatı konfigürasyonları belirlemişlerdir.

8.6.9 Boyuna Derz Yük Transfer Etkinliği ve Bağlantılar

Boyuna trafik şeridi ile bağlı banket arasındaki derzin yük transferi, plağın (tekerlek yüklemelerinin arasındaki) üst yüzeyinde oluşan enine eğilme gerilmesinin şiddetini etkiler. Temel olarak, bu yük transferi; enine çatlaklar arasındaki boyuna çatlak gelişimini yani zımbalama etkisiyle gelen bozulmaları kontrol altında tutan plak yüzeyindeki kritik enine gerilmelere etki eder. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda kullanılan banketlerinin çoğunun sürekli donatılı tipte olmamasından ve ayrı bir şekilde inşa edilerek sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıya bağlanmasından dolayı, uzun dönemli yük transferi oldukça düşüktür ve kalıcı bağlantının sağlanması oldukça güçtür.

8.6.10 Boyuna Derzlerin Derinliği

Mevcut tasarım prosedürleri, boyuna çatlama yada zımbalama etkisinin tahmininde oluşturulan boyuna derz derinliğini doğrudan doğruya dikkate almamaktadır. Buna rağmen, oluşturulan derinlik, derzlerin çatlamasını ve ulaşılan yük transferini

etkilemektedir. Derzlerin etkili ve rastgele olmayan bir biçimde çatlamasını garanti edecek minimum derinlik arzu edilir. Plak kalınlığının 1/3'ü derinliğinde oluşturulan boyuna derzler önerilmektedir.

8.6.11 Temel

Temel tipi ve malzeme özellikleri; çatlak aralığına, plak destekliğine ve destek kaybına (erozyonu), zımbalama etkisine, pürüzsüzlüğe ve inşa maliyetlerine etki eden kritik özelliklerdir. Ağır trafiğe açık sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için güçlü temel desteği önemle dikkate alınmaktadır. Saha çalışmaları, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda; temel rijitliğinin büyük ölçüdeki değişkenliğinin ve temel tabakası sürtünmesinin, çatlama örneklerinde ve aralığında büyük bir değişimle sonuçlanacağını göstermiştir. Buna ek olarak, farklı temel tabakalarının potansiyel erozyonu ve bunların malzeme özellikleri oldukça değişkendir.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların bağlanması, arzu edilen çatlak aralığının sağlanabilmesi için gereklidir (aksi takdirde çatlak aralığı aşırı uzun olacaktır). Örneğin, bağlayıcısız bir agrega temel üzerine inşa edilen rijit üstyapılarda, sürtünmenin çok daha olmasından dolayı çok daha uzun çatlak aralıkları görülür. Aslında çimento ile stabilize edilen temel tabakasına nazaran ince asfalt betonu tabakaları üzerine yerleştirilen sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların çimento ile stabilize edilmiş veya grobeton temel tabakası üzerine doğrudan yerleştirilmesi durumunda, aderansın azaltılması ve temelden gelecek olan yansıma çatlaklarının önlenmesi için duble pudra bileşeni gibi bazı kısmi aderans kırıcı tiplerine ihtiyaç duyulabilir.

Temel tabakası kalınlığı da önemlidir; daha yüksek düzeyde kenar destekliğinin sağlanabilmesi ve potansiyel erozyonu azaltılabilmesi için temel tabakasının sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı plak kenarının ötesine kadar uzatılması gerekecektir.

Temel modülü de rijit plaktaki enine gerilmeleri etkiler. Pompaj hareketinden kaynaklanan erozyona karşı dirençin; çatlamların ve zımbalama etkisinin beklenenden çok daha önce ortaya çıkmasına sebep olabilecek potansiyel deteklik kaybını ve agregalar arasında kenetlenme kuvvetindeki yıpranmayı azaltacağı çok aşırıdır. Saha çalışmalarından biri, erozyonda sebep olacağı azalma nedeniyle grobeton temel tabakası dayanımının artırılmasının, zımbalama etkisinin tekrar oranını

önemli derecede azaltacağını göstermiştir. Çatlama modelleri ve üstyapının yapısal stabilitesi üzerindeki etkisi nedeniyle açık-gradasyonlu temellerin dikkatle kullanılması gerekmektedir.

Temel tipinin; plak kalınlığını, çatlak genişliği, portland çimentosu betonunun malzeme özelliklerini, çatlak aralığını, erozyon direncini, kamyon trafiğinin düzeyini ve maliyetleri de içeren diğer tasarım özelliklerinin kapsamı içinde seçilmesi gerekmektedir. Genel olarak belirtmek gerekirse, amaç; kabul edilebilir desteklik seviyesini, tasarlanan çatlak aralığını ve çatlak genişliğini, erozyon direncini ve tasarım süresince arzu edilen güvenlik seviyesindeki pürüzsüzlüğü sağlayabilecek minimum maliyetteki temel tabakasının seçilmesidir.

8.6.12 Taban Zemini

Temel tabakasının altında, bir alt-temel tabakasının kullanımı; taban zemininin tipine ve rijitliğine, temel tabakasının tipine (bağlanmamış veya stabilize temel) ve açık-gradasyonlu bir drenaj tabakasının kullanımına içeren birçok tasarım faktörüne bağlı olarak değişim gösterir. Saha çalışmaları, stabilize temel üzerine yerleştirilen derzli donatısız tipteki rijit üstyapı plaklarının altında erozyonun etki gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu gibi tasarımlarda; potansiyel erozyonun ve stabilize temel tabakası altındaki desteklik kaybının minimuma indirilebilmesi için bir granüler alt-temel tabakasının sağlanması oldukça önem taşımaktadır. Stabilize edilmiş temel tabakasının altına yerleştirilen bu gibi granüler tabakaları pek çok kurum spesifik olarak belirlemiştir. Agregat alt-temeller, aynı zamanda, ince-taneli ve çok yumuşak taban zemini üzerindeki ince tanelerden kaynaklanan kirlenmeye karşı agrega temel tabakası korunmasının bir ölçütü olarak da kullanılabilir. Açık-gradasyonlu drenaj tabakasının içine ince tanelerin girmesini engellemek için, geçirgen zeminin altında, bir filtre tabakası için gradasyon gerekliliklerini karşılayan yoğun-gradasyonlu bir alt-temel tabakasının kullanımı gerekli olmaktadır.

8.6.13 Yüzey-altı Drenajı

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, stabilize edilmiş açık-gradasyonlu rijit bir drenaj tabakasının üstüne yerleştirildiklerinde bu duruma özel problemler gözlemlenebilir. Portland çimentosu betonunun açık-gradasyonlu temel tabakası içine süzülmesi, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı plağının efektif kalınlığını değiştirmesi çatlak aralığına ve genişliğine etki eder. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda

geçirimli bir tabakanın (düşük derecede geçirimli) kullanılması durumunda, sözkonusu geçirimli tabakanın bitüm ile iyileştirilmiş temel tabakasının altına ve taban zemininden gelen ince tanelerin süzülmesini önleyecek bir granüler alt-temel tabakasının üstüne yerleştirilmesine çalışılmalıdır. Bu tasarım ağır trafikli otoyollarda başarıyla kullanılmaktadır.

8.6.14 Banket Tasarımı

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, çok çeşitli banket tasarımıyla başarıyla tasarlanabilmektedir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların trafik şeritleri için kullanılan örnek banket tasarımı, ya kayma donatısız olan derzli donatısız tipteki rijit üstyapı (ana trafik şeritlerinin yerleştirilmesinden sonra inşa edilir) ya da asfalt betonundan banket olmaktadır. Her iki durumda da, yük transferi zamanla azalabilir ve bundan dolayı şerit/banket derzinin yük transferini arttıracak ciddi çalışma yapılmadığı sürece herhangi bir etkisi hesaba alınmamalıdır. Bununla birlikte, banket tasarımı, yapım maliyetini ve üstyapı performansını etkileyecektir. Banket ile trafik şeridi arasındaki bağı kapsayan en önemli anahtar bakış açısı; banket altındaki temel tabakası malzemesinin aşınabilirliği ve banketlerin düzenli trafik için acil durumlardaki kullanımı ve park ile kapasitede ortaya koyduğu artıştır.

8.6.15 Taban Zemininin İyileştirilmesi

Yumuşak ve ıslak olan taban zemini yüzeyinin iyileştirilmesi; destekliği iyileştirir, inşa kolaylığı ve üstyapı üniformluğu sağlar. Taban zemininin iyileştirilmesi üst yüzeyin stabilizasyonu yada kalın granüler tabakanın kullanımıyla başarılabılır. Mevcut tasarım süreçleri, plak defleksiyonlarını azaltan arttırılmış modül anlamında taban zemini iyileştirmesini doğrudan doğruya dikkate alabilir. Eğer tasarımcı bunun böyle olacağına inanıyorsa, proje boyunca desteklikteki değişkenliğin azaltılması da dikkate alınabilir. Taban zemini iyileştirmesinin diğer bir faydası da taban zemini üzerindeki erozyon potansiyelinin azaltılabilecek olmasıdır. Tasarım kılavuzunda, BÖLÜM 1, Kısım 1 taban zemini iyileştirme tekniklerini daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

8.7 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Tasarım Süreci

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımı; kabul edilebilirlik seviyesinde tüm performans kriterlerini karşılayacak üstyapı çalışmalarını destekleyen tasarım özelliklerinin seçilmesini kapsamaktadır. Tasarımcı başlangıç deneme tasarımını seçip performansını analiz eder. Eğer performans kriterleri, istenen güvenilirlik seviyesinde karşılanamazsa, tasarımcı tüm seçilen kriterler tatmin edilinceye kadar değişikliklere gitmelidir. Bu kısım istenen tasarım özellikleri, malzemeler, performans kriterleri, aşırı gerilmeler sonucu ortaya çıkan bozulmaların tahminleri ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımı için yapılacak ayarlamaları açıklamaktadır.

8.7.1 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Performans Kriterleri

Tasarım performans kriterleri, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım süresince başarılı performans göstermesini sağlamada yardım için gereklidirler. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için iki önemli kriter ortaya konmuştur; zımbalam etkisi ve pürüzsüzlük (IRI). Çatlak genişliğinin arzu edilen düzeyde olup olmadığı dikkate alınabilecek diğer bir kriterdir. Buna ek olarak tasarımın güvenilirlik seviyesi, seçilecek performans kriteri ile ele alınmalıdır. Örneğin, eğer çok yüksek düzeyde bir tasarım güvenilirliği seçilmişse, daha düşük düzeydeki güvenilirlik düzeyindekine göre daha yüksek bir düzeydeki zımbalama etkisi ve pürüzsüzlük seçinilebilecektir. Bu durum, erişinilmesi mümkün olmayan performans kriterlerinin ve güvenilirlik düzeyinin seçimini engellemektedir.

8.7.1.1 Çatlak Genişliği ve Yük Transfer Etkinliği

Yetersiz çatlak genişliği tasarımı, zımbalama etkisinin artışıyla sonuçlanacak ve bazı sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların erkenden bakıma alınmasını gerektirecektir. Tasarımcı, tasarım ömrünün sonundaki daha soğuk aylar sırasında oluşabilecek maksimum çatlamayı dikkate alabilir. Bu değer denenerek elde belirlenmek durumundadır ama kalibrasyon deneyimlerine dayalı olarak donatı derinliğinde 0.02 in (0.5 mm)'den az olacağı söylenebilir. Böyle bir değer yasarımcı için genel bir parametre olarak kullanılabilir çünkü; sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların özellikle büyük hacimdeki ağır kamyon trafiğine maruz kaldığı durumlarda, çatlak genişliğinin çatlak yük transfer etkinliği kaybı üzerinde çok önemli bir etkisi

bulunmaktadır ve çatlak yük transfer kaybı büyümesini sınırlandırılması arzu edilebilecektir. Ortalama çatlak yük transfer etkinliği %95 üzerinde sürdürülmelidir.

8.7.1.2 Zımbalama Etkisi

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için, zımbalama etkisi bozulması, sürücüler için çok kritik olan pürüzsüzlük kaybına neden olabilecek önemli bir faktördür. Zımbalama etkisi tanımlamaları ve zımbalama etkisi modelinin kalibrasyonunda kullanılan veri-tabanları, zımbalama etkisiyle ortaya çıkan bozulmaların %90 'ının üzerindeki bir kısmının düşük şiddette olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı, çoğunluğun düşük şiddette olmasından kaynaklı olarak, normalden daha yüksek bir performans kriterinin göz önüne alınması uygun olabilmektedir. Her mil başına 10 ile 20 arasında değişen değerler, %95'lik yada daha düşük güvenilirlik düzeyi dikkate alındığında, başlangıç değerleri olarak uygun görülebilir. Bu girdi uygun değerlerin seçilmesinde yerel kalibrasyonu gerekli kılmaktadır.

8.7.1.3 Pürüzsüzlük

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, uzun bir zaman süreci sonrasında (25) bile örnek bir pürüzsüzlük gösterebilmektedir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların IRI ile ölçülen pürüzsüzlük, sürücüler için en önemli etmendir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım periyodu boyunca istenilen performansı gösterebilmesinin garanti altına alınabilmesi için IRI üzerine limitlerin konulması arzu edilir. Kritik pürüzsüzlük seviyesi, sürücülerin kaliteli sürüş değerlendirmeleri konusunda biçtiği değere bağlıdır. Bu değerlerin tasarımcı tarafından seçilmesi ve arzu edilen güvenilirlik seviyesini aşmaması gerekir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım ömrü sürecinde sağlanan pürüzsüzlük, inşa sırasında elde edilecek başarıya son derece bağlıdır. Böylece başlangıç IRI girdisi CRCP'nin inşası sırasında tespit edilecek pürüzsüzlük spesifikasyonlarının dikkate alınması konusunda seçici olunmalıdır. Bu yüzden, başlangıçtaki IRI girdisinin; sürekli donatılı tipteki rijiti üstyapıların inşa edileceği pürüzsüzlük şartnamelerinin de göz önüne alınarak seçilmesi gerekir.

8.7.2 Deneme Tasarımı

Deneme tasarımı, Bölüm 8.6'daki sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım değerlendirilmelerinde açıklanan faktörler dikkate alınarak seçilmelidir. Farklı tasarım koşulları için elde bulunana üstyapı tasarımları ile ilgili yerel deneyim, deneme tasarımının seçiminde en değerli kaynak olacaktır. NCHRP projesi 1-32 altında geliştirilen tasarım kataloğu deneme tasarımı seçimine de yardımcı olabilir. Örnek bir deneme tasarımı, aşağıdaki özellikleri kapsayabilir:

- Portland çimentosu betonu dayanımı – tipik tasarım dayanımı. Uygun tasarım girdisinin beklenen ortalama dayanım olduğu ve inşa için gerekli minimum dayanım olmadığı gözden kaçırılmamalıdır.
- Plak deneme kalınlığı – Trafik düzeyine, portland çimentosu betonu özelliklerine ve iklime bağlıdır. Ayrıt desteğinden (bağlanmış rijit banket veya genişletilmiş plak) yoksun sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için gerekli başlangıç deneme kalınlıkları aşağıdaki gibidir.:
 - Düşük yoğunluktaki trafik (iki yönlü ADTT<1000) – 8 inç yada daha azı.
 - Orta yoğunluktaki trafik (iki yönlü ADTT<3000) – 9 -10 inç arası.
 - Yoğun trafik (iki yönlü ADTT<3000) – 10 inç veya yukarısı.

Daha kalın plağa, yağışlı veya yağışlı (kurak)-don görülen alanlardan ziyade yağışsız-don görülmeyen alanlarda ihtiyaç duyulur. Deneme kalınlığı kenar destekli sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için 1 inç azaltılabilir.

- Donatı yüzdesi – Genel olarak, donatının, çatlak genişliğini üstyapı ömrü süresince oldukça sıkı tutabilmeye (örneğin, donatı derinliğinde 0.02 inçten daha az) yeterli olması gerekir. Deneme değerleri orta yoğunluktaki trafik için 0.60-0.70 aralığında ve yoğun kamyon trafiği için 0.70 ile 0.80 arasında değişebilir.
- Temel ve alt-temel– Ağır trafikli sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için normal olarak bitüm yada çimento ile stabilize edilmiş temel tabakaları tavsiye edilir.
- Kenar destekliği – Ayrı olarak inşa edilen ama sonradan bağlanan derzli donatısız tipteki banketler, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar ile yaygın olarak kullanılmakta ve kritik defleksiyon ve gerilmeleri azaltmada etkin bir yol oynamaktadır.

8.7.3 Zımbalama Etkisinin Tahmin Modeli

Zımbalama etkisi bozulmasının gelişimi, birbirine çok yakın şekilde bulunan enine çatlaklar arasında boyuna çatlağın oluşmasıyla doğrudan doğruya ilişkilidir. Bu çatlak, enine çatlağın yük transfer etkinliğini kaybetmesi sonrasında rijit plağın üst yüzeyinde başlayarak sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı boyunca aşağıya doğru ilerler. Boyuna çatlağın gelişimi, rijit plağın enine yönde bükülmesinden kaynaklanan birikmiş yorgunluk hasarıyla ilişkilidir. Bu yüzden, zımbalama etkisi tahmini, boyuna çatlakların oluşumuyla bağlantılı birikmiş yorgunluk hasarı anlamında tasarım sürecinde dikkate alınabilir.

Zımbalama Etkisi Modeli

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda gözlemlenen zımbalama etkisi; zımbalama etkisini, enine doğrultudaki yukardan-aşağıya gerilmelerden kaynaklanan birikmiş yorulma hasarının bir fonksiyonu olarak tahmin eden kalibre edilmiş bir model kullanılarak tahmin edilir. Ulusal olarak kalibre edilmiş model aşağıdaki gibidir.

$$PO = \frac{A}{1 + \alpha \cdot FD^\beta} \quad (8.47)$$

PO = tahmin edilen mil başına düşen zımbalama etkisi sayısı

FD = y. yıl sonundaki hesaplanmış yorulma hasarı (enine yönde plak eğilmesinden kaynaklanır)

A, α , β = kalibrasyon sabitleri (sırayla 105.26, 4.0, -0.38)

İstatistik modelleri;

$$R^2 = 0.67$$

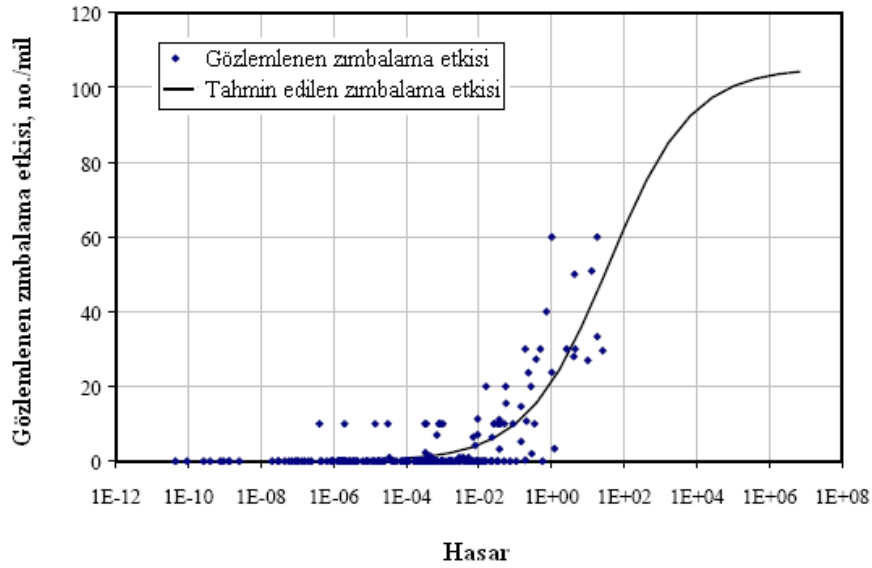
$$SEE = 4.73 \text{ zımbalama etkisi/mil}$$

$$N = 220$$

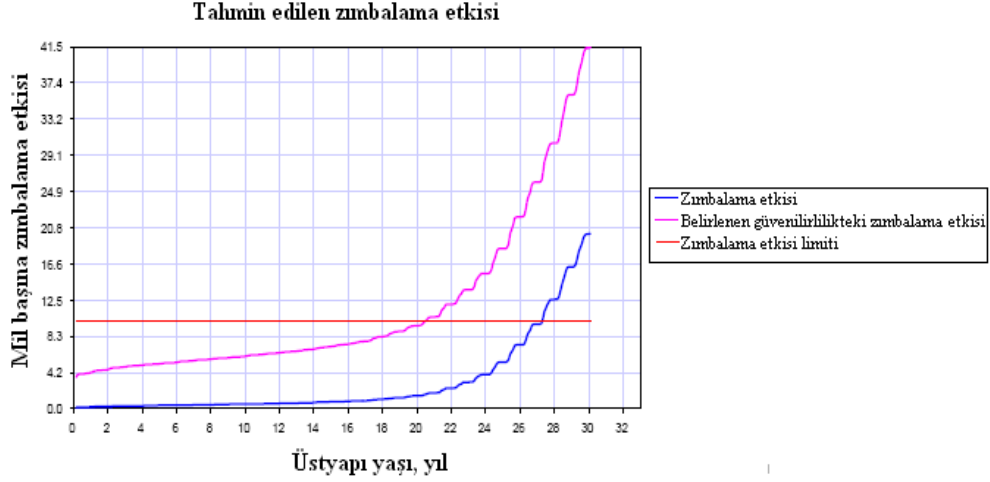
Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için kullanılan bu zımbalama etkisi modeli, 23 eyaletten toplanan 74 saha uygulamalarının performansına dayalı olarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon kesimleri; 57 LTPP GPS-5 kesimlerini, Vandalia'daki & test kesimini ve Chicago yakınındaki yoğun trafiğe sahip 11ağır trafikli kesimi kapsamaktadır. Zaman-serisi verileri, 220 saha zımbalama etkisi gözlemi yapılarak elde edilmiştir. 8.47 denklemi ile verilen zımbalama etkisi tahminleri, Şekil 8.48'de

gösterilmektedir. Şekil 8.49, bir örnek kesim için olarak yaşlanmaya karşılık oluşan zımbalama etkisi tahminini göstermektedir. Bu tahminler, yorulma hasarının bu kısımda açıklanan prosedürlere göre hesaplanması durumunda geçerlidir.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların boyuna derzlerindeki desteklik kaybı, zımbalama etkisi bozulmasında anahtar bir faktör olarak tanımlanmıştır. Komşu plak segmentleri arasındaki yük transferi için agregalar arası kenetlenmenin olduğu enine çatlaklar üzerindeki çatlak kesme gerilmesini ve plak yüzeyindeki çekme gerilmelerine olan direkt etkisinden dolayı önemli bir rol oynamaktadır. Kesme gerilmesindeki artış, daha düşük yük transferine ve artan enine eğilme gerilmesine yol açan agrega yıpranma oranını artırır. Buna rağmen, destek koşulları sağlanabildiği sürece ve agregalar arasındaki kenetlenmede yıpranma minimize edildikçe, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki eğilme gerilmeleri nispeten daha küçük olacaktır ve tüm eleverişli amaçlar için sınırsız yorulma ömürleri ile sonuçlanacaktır. Bu nedenle, çatlak boyunca yük transferinin yüksek düzeyde sürdürülebilmesi ve sürekli donatılı tipteki rijit plaka altındaki tüm desteklik koşullarının sağlanması kritik rol oynamaktadır.



Şekil 8.48: Hasar birikimine karşı gözlemlenen zımbalama etkileri [15]



Şekil 8.49: Verilen bir kesim için sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisinin tahmin örneği [15]

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, kuruma rötresi; erken çatlama başlangıcına katkıda bulunan en önemli faktördür. Büyük oranda buharlaşma miktarına dayalı olarak değişen kuruma rötresi, kür kalitesi ve su/çimento oranı betonun yerleştirilmesinde dikkate alınan faktörlerdir. Kuruma rötresi; betonun sıcak hava koşulları altında yerleştirilmesi durumunda ve elverişli tasarım karışımı özelliklerinin (örneğin; yüksek çimento şerbeti içeriği veya yüksek su/çimento oranı) varlığı durumunda genellikle daha büyüktür. Eğer buharlaşma oranları aşırı düşükse, daha uzun çatlak aralıklarının oluşma potansiyeli artar. Buharlaşma aşırı yüksek ise, o zaman; daha kısa çatlak aralıklarıyla ve azalan beton dayanımları ile sonuçlanır. Minimum ve maksimum kür limitlerinin, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı sistemlerinde optimum çatlak gelişimini sağlayacak biçimde ortaya konması gerekir. Saha plaklarındaki nem ölçümleri, betondaki kuruma sürecinin beton plağın daha üst kısmındaki rötre gelişimine eğilimi olduğunu göstermiştir. Bu ölçümler; yağışlar ve değişken nem koşullarınca ortaya çıkan ıslanma ve kuruma döngüleri nedeniyle, üstyapı plağı boyunca lineer olmayan nem profilini göstermektedir.

Isıl genleşme katsayısı, çatlak aralığı ve çatlak açıklığındaki en önemli faktörlerden biridir. Bu katsayı değerinin düşüklüğü daha iyi sonuçlar verir.

Erozyon potansiyeli; yukarı doğru kıvrılma ve ayırıt boyunca çarpılma ve köşelerde biriken suyun tekerlek yükü altında plak / alt-temel ara yüzeyi boyunca bir ileri bir geri hareket halinde olan alanlarda en büyük değerdedir. Bu durum suyun nispeten viskoz doğası ile birleştirildiğinde, bu pompaj hareketi alt-temel malzemesini

aşındıran kesme gerilimi yaratır. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarımındaki erozyon performansının sunumu, malzeme modellerinin ve daha önce yapılmış araştırmalardaki önerilen eşitlikler üzerinde odaklanmıştır. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların sınırı boyunca ortaya çıkan temel tabkasındaki erozyon; malzeme aşınabilirlik potansiyeliyle, yağışla ve bir stabilize temel altındaki bir granüler tabakanın varlığıyla ilişkilidir. Klavuzda, BÖLÜM 2, kısım 2 ; zamanla plak ayrıtının altındaki desteklik kaybının tahmin edilmesinde kullanılan modeli açıklamaktadır. Aşağıdaki faktörler, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalamaya etki eden faktörler olarak gösterilmiştir:

- Yeterli orandaki donatının varlığı
- Portland çimentosu betonunun kalınlığı
- Stabilize temel tabakalarının kullanımı ve malzeme dayanımı ile durabiletesi.
- Temel ve taban zemini tipi
- Desteklenmemiş üstyapı ayrıtları yakınındaki araç yüklemeleri.
- Zayıf plak ayrıt desteği.
- Açık gradasyonlu temel tabakasını içeren yüzey-altı drenajı.
- Donma indeksi / donma-çözülme döngüsü sayısı
- Portland çimentosu betonunun sıfır gerilim ısını ve inşa sırasındaki kıvrılma/çarpılmayı içeren inşa koşulları
- Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda; plak geometrisinin ve sıcaklık/nem gradientlerinin ekilerini kapsayan, kıvrılma ve/veya çarpılma

Yapısal Tepki Modellemesi

Şekil 8.8’de görüldüğü gibi, kritik kamyon dingil yüklemesi, plak köşelerine mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilen tekli, ikili, üçlü ya da dörtlü dingilleri kapsamaktadır. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların üst yüzeyinde neden olunan gerilmelerin büyüklüğü, gece vaktinde sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı panelleri yukarı doğru kıvrıldığında en büyük değerine ulaşır. Sıcaklık değişimlerinden ve çatlak bozulmalarından kaynaklanan enine çatlak boyuncaki yük transfer etkinliği kaybı temel/alt-temel erozyonuyla hız kazanır ve aynı zamanda çekme gerilmelerini kayda değer oranda artırır

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, plak yüzeyindeki eğilme gerilimin büyüklüğünü etkileyen faktörler aşağıdadır:

- Portland çimentosu betonu kalınlığı
- Portland çimentosu betonu elastisite modülü
- Portland çimentosu betonu Poisson oranı
- Portland çimentosu betonu birim ağırlığı
- Portland çimentosu betonu ısı genleşme katsayısı
- Portland çimentosu betonu kalınlığı
- Temel tabakası kalınlığı
- Temel tabakası elastisite modülü
- Bağlanmamış olduğu varsayılan portland çimentosu betonundan plak ve temel arasındaki ara yüzün durumu
- Ortalama çatlak aralığı (Kritik segment için 2 ft'e (0.6 m) eşit olduğu varsayılmakta)
- Taban zemini rijitliği
- Çatlak yük transfer etkinliği
- Portland çimentosu betonundan plağın üst ve alt yüzey sıcaklığı arasındaki edeğer farklılık
- Rijit plak boyunca nem dağılımı
- Kalıcı kıvrılma ve çarpılma değişim ölçüsünün büyüklüğü
- Dingil tipi (tekli ve ikili)
- Dingil ağırlığı
- Dingil yerleşimi (kritik plak ayırından belli mesafede) - boyuna ayırtan 0 ile 18 inç (0-45 cm) arasında değişim gösterir.

Not 1: Portland çimentosu betonundan plak ile temel arasındaki yüzey bağlanmamış kabul edildiğinden dolayı, temel tabakasının birim ağırlığı "0" olarak alınır. Bu; rijit plak ile temel tabakası arasındaki bağlanmamış yüzeyde normal bir çekme gerilmesinin olmadığını yansıtmaktadır ve bu yüzden temel tabakası rijit plağı yüklememektedir

Not 2: Temel tabakasının ısı genleşme katsayısının, portland çimentosu betonu ısı genleşme katsayısına eşit olduğu varsayılmaktadır.

Not 3: Boyuna şerit-şerit derzinin yük transfer etkinliği sapmasının %50'e eşit olduğu varsayılmaktadır.

Yukarıdaki birçok parametre tasarım süresince (örneğin, beton plaka kalınlığı ve eklem açıklığı) sabit kalırken diğer parametreler mevsimlik, aylık, saatlik yada üstyapı yaşı açısından değişim gösterir. Hassas yorulma analizleri sonuçları için, önemli miktarda farklı gerilmeler yaratan tüm olaylar birbirinden farklı olarak değerlendirilmelidir. Bu rehberde tanımlanan yorulma hasar artışı, aşağıda verilen koşullar için belirlenmektedir:

- Üstyapı yaşı – Portland çimentosu betonu modülündeki değişimleri yıl itibariyle dikkate alır.
- Ay – Temel tabakası rijitliğindeki, taban zemini rijitliğindeki (efektif k-değerindeki, nem ve sıcaklığın temel ve alt-temel tabakaları üzerindeki birleşmiş etkilerini içeren) ve diferansiyel rötre nedeniyle plak çarpılmaları üzerindeki bağlı nem değişiml etkileri aylık olarak dikkate alınır.
- Yüklemeye düzeni (dingil tipi).
- Yük düzeyi

Tekli akslar – 1.000 lb (0.45 t) artışlarla 3.000 (1.35 t)– 41.000 lb (18.6 t)

İkili akslar – 2.000 lb (0.90 t) artışlarla 6.000 (2.7 t) -82.000lb (37.2 t)

Üçlü akslar – 3.000 lb (1.35 t) artışlarla 12.000 (5.4 t) – 102.000lb (46.3 t)

Dörtlü akslar – 3.000 lb (1.35 t) artışlarla 12.000 (5.4 t)–102.000lb (46.3 t)

- Sıcaklık – sıcaklık gradientlerinin etkileri, kalıcı kıvrılma/çarpılma ve etkili sıcaklık farkı (üst - alt) olarak ifade edilen nemsel çarpılmadaki aylık değişim. – 2°F'lık adımda ortaya çıkan (çoğu negatif) minimum 0°F'lık değer.
- Yük pozisyonu – Belirlenmiş yanal ötelemelerde (plak sınırından yaklaşık 48 in (1.2 m) mesafelerle) yerleştirilen yüklerin sebep olduğu kritik hasar lokasyonundaki hasarın hesaplanmasında trafik gezinimi etkilerini dikkate almak için geliştirilen işlemler.

Sonlu bir eleman analiz programı, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki bu gibi kritik gerilmeleri yeterli bir şekilde çözümlemek için gerekmektedir. Tasarım

rehberindeki gerilme hesaplamaları, ISLAB 2000 kullanılarak yapılan büyük sayıdaki sonlu eleman analizlerine dayalı olarak geliştirilen nöral ağılar kullanılarak yapılır. Nöral ağılar içinde yer alan girdi parametrelerinin aralıkları Tablo 8.9'da görülmektedir. Bu alanlar, her bir parametre için pratik limitleri temsil etmektedir.

Tablo 8.9: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların yüzeyindeki kritik gerilmelerin hesaplanmasında kullanılan nöral ağılar için girdi parametrelerinin dağılımı [15]

Girdi Parametresi	Minimum Değer	Maksimum Değer
Rölatif rijitlik yarıçapı ^a	22.5 in	80 in
Enine derzlerin yük transfer etkinliği	0%	95%
Plak kenarına olan dingil mesafesi	0 in	18 in
Dingil görüntü oranı (enden-boya)	10	0.5
Sıcaklık farklılığı (tavan-taban)	-55 °F ^b	0 °F
Dingil ağırlığı, tekil dingil	0 lb	45,000 lb
Dingil ağırlığı, tandem dingil ^c	0 lb	90,000 lb
Boşluk büyüklüğü	0 in	36 in

^a Karayolları üstyapıları için rölatif rijitlik yarıçapı genellikle 22.5-80 in arasındadır. Rölatif rijitlik yarıçapı için, plak toerisine dayanan bu değerler yukarıdaki limitleri aştığında oldukça hatalı sonuçlar vermeye başlar.

^b Portland çimentosu betonunun genleşme katsayısına, k-değerine, portland çimentosu betonu birim ağırlığına, portland çimentosu betonu kalınlığına ve rölatif rijit yarıçapına göre değişir.

^c Tandem aralığının 51 in'e eşit olduğu varsayılmıştır.

Zımbalama Etkisinin Tahmin Prosedürü

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda kalibre edilmiş zımbalama etkisinin tahmin modeli, yorulma hasarının bu kısımda altı çizilen aşağıdaki işlemlerle hesaplandığı taktirde geçerlidir. Bu kısımda, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisinin tahmin edilmesinde kullanılan prosdür adım adım sunulmuştur. Sözü edilen adımlar şöyledir:

1. Girdi verilerinin tablolaştırılması – sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisinin tahminlenmesi için gerek duyulan tüm girdilerin özetlenmesi.
2. Trafik verilerinin işleme süreci – Ele alınan trafik verilerinin; ikili, üçlü ve dörtlü aksların her bir geçişle ortaya çıkan eşdeğer tekli, ikili ve üçlü dingil sayısının tam olarak belirlenmesi için ayrıca işlenmesi gerekir.
3. Üstyapı sıcaklık profili verilerinin işlenmesi – EICM kullanılarak (doğrusal olmayan dağılım) oluşturulan saatlik üstyapı sıcaklık profillerinin takvim ayı itibari ile eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılıklarının dağılımına dönüştürülmesine gereksinim duyulur. Sıcaklıklar, aynı zamanda; bitüm ile

stabilize edilmiş temel tabakalarının dinamik modülünün hesaplanmasında da kullanılır.

4. Çatlak aralığının hesabı – Enine çatlak oluşumunun hassas bir şekilde tahmin edilmesi, başarılı bir sürekli donatılı tipteki üstyapı tasarımı için son derece önemlidir. Enine çatlama, çatlak aralığıyla ve çatlak açıklığıyla karakterize edilir. Genellikle, uzun çatlak aralıkları; daha geniş çatlak açıklığı ve yük transfer etkinliği kaybı ile sonuçlanır. Portland çimentosu betonu rötresini, portland çimentosu betonu ısı büzülmesini, portland çimentosu betonu çekme dayanımını, inşa sırsındaki portland çimentosu betonu sıfır-gerilme sıcaklığının, çelik donatının miktarı ile derinliğini ve temel tabakaları arasındaki sürtünmeyi içine alan birçok parametre çatlak aralığını etkilemektedir.
5. Çatlak genişliğinin ve bir ay için yük transfer etkinliğinin hesabı
6. Bir ay için, boyuna plak ayrıtı boyunca desteklik kaybının hesabı
7. Kritik gerilme hesabı – Her bir yükleme düzeni (dingil tipi), yükleme düzeyi, yanal yükleme pozisyonu ve bir aylık sıcaklık değişimine denk gelen, plak yüzeyindeki kritik enine gerilimenin hesabı.
8. Aylık çatlak rijitliği bozulmasının hesabı.
9. Aylık bağıl nemlilik verilerinin işlenmesi – efektif sıcaklık farklılığı olarak açıklanan plak çarpılmalarındaki aylık değişim bağlamında dikkate alınan diferansiyel rötre üzerindeki mevsimsel nem değişimlerinin etkileri.
10. Yorulma hasarının hesaplanması – Hasarın her bir hasar artışı için hesaplanması ve toplam hasarı belirlemek için toplanması.
11. Zımbalama etkisi miktarının belirlenmesi – 8.47 formülü ile zımbalama etkisinin tahmin edilmesi.

5.adımdan 9. adıma kadarki adımlar, tasarım periyodundaki her ay için yapılmaktadır. Bu adımların ayrıntıları aşağıda belirtilmiştir.

1. Adım: Girdi verilerinin tablolaştırılması

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi tehmini için gerekli tüm girdilerin tablolaştırılır. İstenen parametreler tablo 8.10'de özetlenmiştir. Bu tabloda

listelenen girdilere ek olarak, aşağıdaki 2, 3 ve 4'üncü adımlardan elde edilen işlenmiş girdiler sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların yorulma analizleri için gereklidir.

2. Adım: Trafik verilerinin işlenmesi

Trafik verileri, öncelikle, tasarım dönemi içindeki her ay, gün ve saatte beklenen tekli, ikili, üçlü ve dördü aks sayısının belirlenmesinde kullanılır. Bu işlem kılavuzda, 2. BÖLÜM, 4. kısımda detaylı olarak açıklanmaktadır. CRCP için, bir aksın her geçişi, Tablo 8.11'de görüldüğü gibi; ait bir yada daha fazla yüklemeye neden olur. Böylece üçlü ve dördü akslar hesaplama amaçlı olarak tekli ve ikili aks sayılarına dönüştürülmüştür. Tüm aks yükleme spekterumu üzerindeki tekli ve ikili aks yüklemelerinin sayısı böylelikle hesaplanmış olmakta ve kritik gerilme ve yorulma hesaplamalarında kullanıma da hazır hale gelmektedir.

3. Adım: Sıcaklık profili verilerinin işlem süreci:

EICM, proje için seçilmil olan meteoroloji istasyonu veri-tabanına dayalı olan mevcut iklimsel verileri kullanarak her gün için saatlik olarak, rijit plağın kalınlığı boyunca eşit olarak ayrılmış 11 noktada sıcaklıkları ortaya koymaktadır. Meteoroloji istasyonlarından elde edilebilir olan veri-tabanları göre, tasarım periyodu süresince hergün için saatlik eşdeğer doğrusal sıcaklık gradientleri hesaplanmaktadır. Bu doğrusal ısı ölçümleri daha sonra tasarım süresince ekstrapole edilmektedir. Bu veri daha sonra birleştirilmiş sıcaklık kıvrılması, nemsel çarpılma ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapının üst yüzeyinde oluşan yüklemelerden kaynaklanan gerilmeleri hesaplamak için kullanılır.

3. Adım: Sıcaklık profili verilerinin işlem süreci:

EICM, proje için seçilmil olan meteoroloji istasyonu veri-tabanına dayalı olan mevcut iklimsel verileri kullanarak her gün için saatlik olarak, rijit plağın kalınlığı boyunca eşit olarak ayrılmış 11 noktada sıcaklıkları ortaya koymaktadır. Meteoroloji istasyonlarından elde edilebilir olan veri-tabanları göre, tasarım periyodu süresince hergün için saatlik eşdeğer doğrusal sıcaklık gradientleri hesaplanmaktadır. Bu doğrusal ısı ölçümleri daha sonra tasarım süresince ekstrapole edilmektedir. Bu veri daha sonra birleştirilmiş sıcaklık kıvrılması, nemsel çarpılma ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapının üst yüzeyinde oluşan yüklemelerden kaynaklanan gerilmeleri hesaplamak için kullanılır.

Tablo 8.10: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi için girdi parametrelerinin özeti [15]

Girdi	Varyasyon *	Kaynak
Tasarım ömrü (yıl)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Projenin açılış ayı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Açılıştaki PCC yaşı (ay)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Her ay için PCC dayanımı (psi)	Tasarım Ayı	PCC dayanım girdi prosesinin sonucu
Her ay için PCC modülü (psi)	Tasarım Ayı	
Donatı içeriği (%)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Boyuna donatı çapı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Boyuna donatı aralığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aderans yaşı kaybı (ay)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Banket tipi (asfalt betonu veya bağlanmış PCC)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Poisson oranı	Sabit	Direkt tasarım girdisi
PCC birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Termal genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{F}$)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Maksimum rötre birim deformasyonu (10^{-6})	Sabit	Direkt tasarım girdisi veya PCC karışım özelliklerine dayanan hesaplamalar
Elastik rötre (maksimum rötrenin %'si)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Maksimum rötrenin %50'sine kadar geçen süre		
Temel kalınlığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Temel birim ağırlığı (pcf)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Aylık temel modülü (psi)	Takvim Ayı	İklimsel Analiz Sonuçları
Aylık efektif dinamik taban zemini k-değeri (psi/in)	Takvim Ayı	"E'nin k'ya" çeviriminin sonucu
Kalıcı kıvrılma/çarpılma ($^{\circ}\text{F}$)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
PCC sıfır-genilme sıcaklığı	Sabit	Direkt tasarım girdisi veya inşa ayına ve çimento içeriğine göre elde edilir
Dıştan-dışa dingil genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Şerit genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Ortalama tekerlek yolu (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Trafik gezinim standart sapması (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Plak genişliği (ft)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Tekerlek basıncı (psi)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Dingil açıklığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Çifte tekerlek aralığı (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi
Tekerlek genişliği (in)	Sabit	Direkt tasarım girdisi

* Tasarım Ayı: Üstyapı yaşına göre değişen parametreler; Takvim Ayı: İklimsel olarak değişen parametreler
PCC:portland çimentosu betonu

Tablo 8.11: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tepki modeli için trafik yüklerinin çevrim kuralları [15]

Dingil Tipi	Etkili Geçiş Sayısı
Tekil	1 geçiş
Tandem	1 tandem dingil segmenti geçişi+1/2 tandem dingil yükü magnitudündeki 1 tekil dingil yükü geçişi
Üçlü	2/3 üçlü dingil yükü magnitudündeki 2 tandem dingil yükü geçişi+1/3 üçlü dingil yükü magnitudündeki 1 tekil dingil yükü geçişi
Dörtlü	1/2 dörtlü dingil yükü magnitudündeki 3 tandem dingil yükü geçişi+1/4 dörtlü dingil yükü magnitudündeki 1 tekil dingil yükü geçişi

4. Adım: Çatlak Aralığı:

Çatlak aralığı, çatlak açıklığının belirlenmesi ve yorulma birikim tahmini için hesaplanacak kritik çekme gerilmelerinin tahmin edilmesi için gereklidir. Çatlak boşluğu, yapı yöntemlerine dayalı pek çok yöntem kullanarak belirlenebilir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı, bir çatlak kontrol seçeneği kullanarak inşa edilecekse, ortalama çatlak aralığı çatlak genişliği ve yorulma hesaplamaları için kullanılmalıdır. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapının rastsal bir şekilde çatlamasına izin veriliyorsa, CRCP 8 benzeri bir dış yazılım yada burada sunulan işlemler kullanılabilir. Ortalama çatlama aralığının tahmin edilmesi için aşağıdaki formül kullanılmaktadır:

$$\bar{L} = \frac{\left\{ f_t - C\sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta}{H} \right) \right\}}{\frac{f}{2} + \frac{U_m P_b}{c_1 d_b}} \quad (8.48)$$

$\bar{L}$ = ortalama çatlak aralığı, in.

f_t = beton çekme gerilmesi, in.

f = taban zemini tipine dayalı olarak aşağıdaki tablodan alınan AASHTO taban zemini sürtünme katsayısı

U_m = en yüksek aderans gerilmesi, psi.

P_b = donatı yüzdesi, birim beton alanındaki (A_c) çelik donatı alanına (A_s) eşittir.

$$P_b = (A_s) / (A_c)$$

d_b = çelik donatı çapı, in.

c_1 = ilk aderans gerilmesi katsayısı

σ_{env} = çevresel kıvrılmalardan kaynaklanan portland çimentosu betonundaki çekme gerilmesi, psi

H = plak kalınlığı, in.

ζ = donatı tabakasının derinliği, in

C = Bradbury'nin kıvrılma/çarpılma gerilmesi katsayısı

σ_0 = Westergaard'ın nominal gerilme faktörü.

$$\sigma_0 = \frac{E_{PCC} \Delta \varepsilon_{tot}}{2(1 - \mu_{PCC})} \quad (8.49)$$

μ_{pcc} = portland çimentosu betonu poisson oranı

$\Delta \varepsilon_{tot}$ = serbest kıvrılma ve çarpılma birim deformasyonu

$$\Delta \varepsilon_{tot} = \alpha_{PCC} \Delta t_{eqv} + \varepsilon_{\infty} \Delta \left(1 - r h_{PCC}^3 \right)_{eqv} \quad (8.50)$$

α_{pcc} = portland çimentosu betonu termal genleşme katsayısı, $1/^{\circ}\text{F}$

Δt_{eqv} = eşdeğer sıcaklık

ε_{∞} = portland çimentosu betonunun maksimum rötresi.

$\Delta(1-rh_{pcc}^3)_{eqv}$ = Mohamed ve Hansen tarafından verilmiş formüllere dayalı olan, plağın altı ile üstü arasındaki bağıl nem farklılığı.

5. Adım: Çatlak Aralığı ve Çatlak Yük Transfer Etkinliği:

Rötreden, termal büzülmeden ve donatı çeliğinin buna karşı tepkisinden ve alt temel sürtünmesinden dolayı donatı seviyesindeki enine çatlakların genişliğinin ortalama olarak tahmini için, aşağıdaki çatlak genişlik formülü bu tasarım işleminde kullanılmaktadır:

$$cw = Max \left(L \cdot \left(\varepsilon_{shr} + \alpha_{PCC} \Delta T_{\zeta} - \frac{c_2 f_{\sigma}}{E_{PCC}} \right) \cdot 1000 \cdot CC, 0.001 \right) \quad (8.51)$$

cw = donatı derinliğindeki ortalama çatlak genişliği, mils.

L = tasarım çatlak dağıtımına dayalı çatlak aralığı, in.

ε_{shr} = donatı derinliğindeki serbest beton kuru rötresi, $\times 10^{-6}$

ΔT_{ζ} = herbir mevsim için donatı derinliğindeki beton “sıfır-gerilme” sıcaklığından portland çimentosu betonu sıcaklığındaki düşüş, $^{\circ}F$

c_2 = ikinci aderans gerilmesi katsayısı.

f_{σ} = portland çimentosu betonundaki donatı seviyesindeki maksimum boyuna çekme gerilmesi, psi

E_{PCC} = portland çimentosu betonu elastic modülü, psi.

CC = yerel kalibrasyon sabiti (ulusal kalibrasyon için $CC=1$)

$\bar{I}$ ayına karşılık gelen atmosferik bağıl nem için donatı seviyesinde her hangi bir t zamanda oluşan serbest rötre birim deformasyonu aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$\varepsilon_{shr}(t) = \varepsilon_{su} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{RH_c}{100} \right)^3 \right\} \quad (8.52)$$

$\varepsilon_{shr}(t)$ = beton yerleştirilmesinden itibaren i ayındaki herhangi bir zamanda serbest rötre birim deformasyonu, $\times 10^{-6}$

ε_{su} = maksimum rötre birim deformasyonu, $\times 10^{-6}$

RH_c = betondaki bağıl nem, yüzde.

$$RH_c = RH_{ai} + (100 - RH_{ai}) f(t) \quad (8.53)$$

RH_{ai} = i ayı için atmosferik bağıl nem, yüzde

$f(t) = 1/(1+t/b)$

t = betonun yerleştirilmesinden itibaren geçen gün sayısı

$$b = 35d^{1.35}(w/c - 0.19)/4$$

d = donatı derinliği, mm.

w/c = su/çimento oranı

Portland çimentosu betonundaki donatı seviyesinde, maksimum boyuna çekme gerilmesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$f_{\sigma} = L \frac{f}{2} + \frac{LU_m P_b}{c_1 d_b} + C \sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta}{H} \right) \quad (8.54)$$

f_{σ} = çevresel kıvrımlardan kaynaklanan portland çimentosu betonundaki çekme gerilmesi, psi.

L = çatlak genişliği, in.

f = Tablo 8.2'den alınan taban zemini sürtünme katsayısı.

U_m = maksimum aderans gerilmesi, psi

P_b = donatı yüzdesi, birim beton alanındaki (A_c) çelik donatı alanına (A_s) eşittir.

$$P_b = (A_s) / (A_c)$$

c_1 = birinci aderans gerilmesi katsayısı

d_b = çelik donatı çapı, in.

C = Bradbury'nin kıvrılma/çarpılma gerilme katsayısı.

σ_0 = Westergaard'ın nominal gerilme faktörü (formül 8.9)

ζ = donatı derinliği, in.

H = portland çimentosu betonu kalınlığı, in.

Enine çatlaklar boyunca rijitliğin ve yük transfer derecesinin, söz konusu çatlakların trafik yüklerinin en büyük şiddetini aldığından, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansı üzerinde önemi büyüktür. 8.51 denkleminde gösterildiği gibi, enine çatlak genişliğinin; günlük ve mevsimsel sıcaklık koşullarına göre değişecek yük transferi anlamına gelen ortalama beton sıcaklığına benzer şekilde değişeceği beklenmektedir. EICM modülü tarafından tahmin edilen donatı

derinliğindeki ortalama aylık sıcaklıklar, çatlak açıklığındaki ve yük transfer kapasitesindeki mevsimsel (aylık değişimleri) olarak tahmin edilmesinde kullanılmaktadır.

Çatlak açıklığı, çatlağın dik kesme yüklerini transfer edilebilmesiyle ilgilidir. Çatlak kesme kapasitesi; çatlak açıklığına ve üstyapı ömrü süresince çatlak yük transferine etki ettiği için mevsimlere göre değişim gösterir. Hasarsız derzin başlangıçtaki kesme kapasitesi aşağıdaki ilişki kullanılarak ifade edilebilir:

$$s_{0i} = 0.05 \cdot h_{PCC} \cdot e^{-0.032cw_i} \quad (8.55)$$

s_{0i} = i zaman artışı için çatlak genişliğine dayalı ilk baştaki boyutsuz kesme kapasitesi

h_{PCC} = plak kalınlığı, in.

cw_i = i zaman artışı için çatlak genişliği ve zamanın bir fonksiyonu olan çatlak genişliği, mils.

Üstyapı ömrü içinde, verilmiş olan herhangi bir enine çatlama örneği için mevcut kesme kapasitesi (i) aşağıdaki formül kullanılarak karakterize edilebilir:

$$s = s_{0i} - \Delta S_{i-1} \quad (8.56)$$

s = i zaman artışı için mevcut çatlak kesme kapasitesi

s_{0i} = i zaman artışı için çatlak genişliğine dayalı ilk baştaki çatlak kesme kapasitesi

ΔS_{i-1} = daha önceki tüm zaman artışlarından hesaplanan kesme kapasitesindeki kayıp.

İlk ay için sıfıra ayarlanır.

Enine çatlak rijitliği, aşağıdaki denklem kullanılarak bilinen çatlak kesme kapasitelerinden yola çıkarak hesaplanabilir.

$$\text{Log}(J_c) = ae^{-e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)}} + de^{-e^{-\left(\frac{s-a}{f}\right)}} + ge^{-e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)}} \cdot e^{-e^{-\left(\frac{s-a}{f}\right)}} \quad (8.57)$$

J_c = mevcut zaman artımı için enine çatlak üzerindeki derz rijitliği

$a = -2.2$

$$b = -11.26$$

$$c = 7.56$$

$$d = -28.85$$

$$e = 0.35$$

$$f = 0.38$$

$$g = 49.8$$

s = boyutsuz kesme kapasitesi

J_s = şerit-banket derzi boyuncaki yük transferi, tipik değerler Tablo 8.12’de verilmiştir. Bu değerler Tasarım Kılavuzu yazılımından alınmıştır.

s = mevcut derz kesme kapasitesi.

Tablo 8.12: Farklı banket tipleri için tipik derz rijitlikleri [15]

Banket Tipi	J_s
Granüler	0.04
Asfalt	0.04
Bağlanmış rijit	4

Kritik yorulma gerilmelerinin tahminindeki bir mekanistik modelde yük transfer etkinliği kullanılmadan önce, temel tabakasının etkisi ve çelik donatının genişletilmiş etkileri şu şekilde modele eklenir:

$$LTE_{TOT} = 100 * \left(1 - \left(1 - \frac{1}{1 + \log^{-1} \left[(0.214 - 0.183 \frac{a}{l} - \log(J_s) - R) / 1.18 \right]} \right) \left(1 - \frac{LTE_{Base}}{100} \right) \right)$$

(8.58)

LTE_{TOT} = agregalar arası kenetlenmeden, çelik donatıdan ve temel destekliğinden kaynaklanan toplam çatlak yük transfer etkinliği; yüzde.

l = i zaman artışı için hesaplanan rölatif rijitlik yarıçapı, in.

a = yüklenmiş bir alanın yarıçapı, in.

R = çelik donatı ile sağlanan kalıcı yük transferini hesaplamadaki kalıcı kayma donatısı-tesir faktörü.

$$= 2.5 P_b - 1.25$$

P_b = boyuna donatı yüzdesi.

LTE_{base} = enine derz boyunca yük transfer etkinliğine temel tabakasının katkısı, %.

Tipik değerler Tablo 8.8’de verilmiştir.

6. Adım: Plağın Boyuna Ayrıtı Boyunca Desteklik Kaybının Hesaplanması:

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların boyuna ayrıtı boyunca desteklik miktarının tahmin edilme süreci, kılavuzda BÖLÜM 2, kısım 2 de verilmektedir. Desteklik kaybı, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım ömrü süresi boyunca aylık olarak hesaplanmaktadır. Desteklik kaybı önemli miktardaysa, kritik gerilme; yorulma hasarında artış ve sonuç olarak zımbalama etkisi gelişimindeki artışla sonuçlanacaktır.

7. Adım: Aylık Bağlı Nem Verilerinin Hesaplanması:

Neme bağlı çarpılma, atmosferik bağlı neme bağlı olarak aylık bir şekilde ayarlanır. Neme bağlı çarpılmadaki aylık değişimin etkileri, eş değer sıcaklık farkıyla ifade edilir ve gerilme hesaplamaları sırasında eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılığına ilave edilir.

$$ETG_{SHi} = \frac{3 \cdot (\phi \cdot \epsilon_{su}) \cdot (S_{hi} - S_{h\ ave}) \cdot h_z \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{h_z}{3} \right)}{\alpha \cdot h^2 \cdot 100} \quad (8.59)$$

ETG_{SHi} = yıllık ortalamadan i ayındaki nemsel çarpılma sapmasının eşdeğer sıcaklık farklılığı

φ = elastik rötrenin faktörünün, toplam rötreye oranı . Daha doğru bir veri elde olmadığı sürece 0.5 kullanılır.

ε_{su} = maksimum rötire birim deformasyonu, x10⁻⁶

S_{hi} = i ayı için bağlı nem faktörü.

$$\begin{aligned}
S_{hi} &= 1.1 \cdot RH_a & \text{için } RH_a < 30\% \\
S_{hi} &= 1.4 - 0.01 \cdot RH_a & \text{için } 30\% < RH_a < 80\% \\
S_{hi} &= 3.0 - 0.03 \cdot RH_a & \text{için } RH_a \geq 80\%
\end{aligned}$$

RH_a = çevresel bağıl nem ortalaması, yüzde.

Sh_{ave} = ortalama yıllık bağıl nem faktörü. Sh_i 'nin yıllık ortalaması.

h_s = rötire zonunun derinliği (genellikle 2 in (5 cm))

h = portland çimentosu betonu plak kalınlığı, in.

α = portland çimentosu betonu termal genişleme katsayısı, $1/^\circ F$.

8.59 denklemi ile verilen neme bağılı çarpılmadaki (ETG_{Shi}) aylık sapmaların eşdeğer sıcaklık farklılığı, gelişmesi zaman alacak olan maksimum rötreye dayalıdır. Betonun yerleştirilmesinden itibaren herhangi bir t zamanındaki ETG_{Shi} ;

$$ETG_{Shi} = S_t \cdot ETG_{Shi} \quad (8.60)$$

ETG_{Shi} = portland çimentosu betonun yerleştirilmesinden itibaren herhangi bir t günündeki ETG_{Shi} ,

ETG_{Shi} = yıllık ortalamadan i ayındaki nemsel çarpılma sapmasının eşdeğer sıcaklık farklılığı, $^\circ F$.

$$S_t = \frac{Age}{n + Age} \quad (8.61)$$

S_t = nemle ilişkili plak çarpılmaları için zaman faktörü.

Age = yerleştirmeden itibaren portland çimentosu betonu yaşı, gün.

n = maksimum rötrenin %50'sinin gelişimine kadar geçen süre, gün. Daha doğru bilgiler elde olmadığı sürece 35gün kullanılır.

8.Adım: Kritik Gerilmenin Hesaplanması:

Analiz edilmesi gerekli olan tüm durumlar için beton plaka plak yüzeyindeki kritik enine gerilme hesap edilir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki zımbalama etkisi için aşağıdaki artışlar dikkate alınır.

- Yükleme düzeni – Dingil tipi

- Yükleme düzeyi – Dingil tipine bağlı olarak, 1.000 (0.45 ton) ile 3.000 lb (1.35 ton) lik olan artışlarda farklı yükleme düzeyleri
- Sıcaklık gradienti – Portland çimentosu betonu rötresi (formül 8.7) ve kalıcı kıvrılma / çarpılma sıcaklık farklılığı nedeniyle eşdeğer sıcaklık farklılığına ilave edilen, her saat için hesap edilen portland çimentosu betonu tavan ve taban arasındaki eşdeğer doğrusal sıcaklık farklılığı
- Yanal yükleme pozisyonu – Hem yukarıdan aşağı hem aşağıdan yukarı çatlama için 6 spesifik lokasyon.

Kritik gerilme hesaplaması, bu bölümde (8.7.3) *Yapısal Tepki Modellemesi* alt başlığında daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

9. Adım: Enine Çatlak Rijitliğinin ve Çatlak Yük Transfer Etkinliğinin Bozulması:

Rijit plak, dingil yüklerine maruz kaldıkça, dikey çatlak yüzeyleri çatlağın her iki yüzeyi arasındaki tekrarlı kesme gerilmelerine maruz kalır ve bu da agrega yıpranmasına ve çatlak yük transfer etkinliği kapasitesinin azalmasına neden olur. Çatlak kesme kapasitesi, çatlak genişliğinin portland çimentosu betonu kalınlığına olan oranı (çatlak genişliği ile portland çimentosu betonu ölçüleri aynı birimde düşünülmüştür) 0.0037'den büyük ise, önemli ölçüde aşınma potansiyeli gösterir. Süre artışı sonundaki kesme kapasitesi kaybı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$\Delta s_i = \sum_j \left(\frac{0.005}{1 + 1 \cdot \left(\frac{cw_i}{h_{PCC}} \right)^{-5.7}} \right) \left(\frac{n_{ji}}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_{ij}}{\tau_{ref i}} \right) ESR_i \quad \text{eğer } \frac{cw_i}{h_{PCC}} < 3.7$$

$$\Delta s_i = \sum_j \left(\frac{0.068}{1 + 6 \cdot \left(\frac{cw_i}{h_{PCC}} - 3 \right)^{-1.98}} \right) \left(\frac{n_{ji}}{10^6} \right) \left(\frac{\tau_{ij}}{\tau_{ref i}} \right) \cdot ESR \quad \text{eğer } \frac{cw_i}{h_{PCC}} > 3.7$$

(8.62)

Δs_i = her bir j ağırlık/dingil grubundaki yük uygulamasından kaynaklanan kesme kapasitesinin üzerindeki kayıpların bir özeti olan çatlak aralığı için kesme kapasitesindeki kayıp.

Cw_i = i zaman artışı için çatlak genişliği, mils.

h_{pcc} = plak kalınlığı, in.

n_{ji} = j yük düzeyi için dingil yükü uygulamaları sayısı.

$\tau_{ref\ i}$ = PCA test sonuçlarından elde edilen referans kesme gerilmesi.

ESR = yanal trafik gezinimi için trafik yükü uygulamalarını ayarlamadaki eşdeğer kesme oranı.

$$ESR = a + \frac{b}{\frac{L}{\ell}} + C \frac{LTE_{crack}}{100}$$
$$a = 0.0026\bar{D}^2 - 0.1779\bar{D} + 3.2206$$
$$b = 0.1309Ln(D) - 0.4627$$
$$c = 0.5798Ln(\bar{D}) - 2.061$$
(8.63)

L = çatlama genişliği, in.

l = rölatif rijitlik yarıçapı, in.

LTE_{crack} = enine çatlaklardaki yük transfer etkinliği, yüzde.

D = plak kenarından tekerlek yolunun merkezine olan mesafe, in.

Referans kesme gerilmeleri (τ_{ref}) aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$\tau_{ref} = 111.1 \cdot e^{-e^{x'}}$$
(8.64)

$$x' = \alpha e^{-(\lambda Ln(J_c))^\gamma}$$
(8.65)

J_c = enine çatlaklardaki hesaplanmış derz rijitliği.

α = 0.9988, bir regresyon sabiti.

λ = 0.1089, bir regresyon sabiti.

γ = 1.0, bir regresyon sabiti.

Bu fonksiyonun katsayıları farklı agrega tiplerine göre değişim gösterebilir ama ilk test sonuçları, farklı kaba agrega tipleriyle yapılan karışımlar arasında kesme kapasitesinin yıpranma davranışında küçük farklılıklar göstermektedir.

Rijit plak daha büyük yük uygulamalarına maruz kaldığında, kesme kapasitesindeki kayıplar her artış için aşağıdaki şekilde toplanarak hesaplanır:

$$\Delta S_i = \sum_{i=1}^{i=\text{mevcut}} \Delta s_i = \Delta S_{i-1} + \Delta s_i \quad (8.66)$$

ΔS_i = i mevcut zaman artırımını içeren tüm zaman artırımları için hesaplanan kesme kapasitesindeki kayıp.

Δs_i = tüm j grubu ağırlık/dingil tiplerinden kaynaklanan mevcut zaman artırım boyuncaki kesme kapasitesindeki kayıp

Δs_{i-1} = i mevcut zaman artırımını hariç tüm zaman artırımları için hesaplanan kesme kapasitesindeki kayıp

10.Adım: Yorulma Hasarının Hesaplanması:

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılardaki zımbalama etkisinin tahmininde kullanılan ana parametre olan enine doğrultudaki plak eğilmesinden dolayı ortaya çıkan birikmiş yorulma hasarının değerlendirilmesi için artışlı bir analiz kullanılmaktadır. Analiz periyodu; üstyapı tasarım ömrüne, beton dayanım kazancına, taban-zemini destekliğine, iklimsel şartlara ve bunların çatlak genişliğine ve yük transferine olan etkilerine dayalı olan zaman aralıklarına bölünmektedir. Ayrı bir analiz, her aylık artış için mevcut adımlarla yapılmaktadır. Sıcaklık gradientlerinin etkileri, saat bazında değerlendirilmektedir. Rijit üstyapılarda sıcaklık koşulları, her gün boyunca sürekli olarak değişim göstermektedir ve üstyapının yapısal tepkimesi üzerinde çarpıcı bir etkisi bulunmaktadır.

Toplam yorulma hasarı her analiz sırasında ortaya çıkan yorulma hasarlarının toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Pek çok girdi parametresi, şekil 8.50’de gösterildiği gibi farklı zaman artışları için ayarlanmaktadır. Bu parametrelerin listesi ve değerlerindeki değişim sebepleri Tablo 8.13’de verilmektedir.

Her bir zaman artışı için trafik şeridindeki trafik yüklerinin sayısı (n_{ij}) analiz süresince trafik veri girdileri kullanılarak hesaplanır. Trafik yük spektrası tahmin edilir ve her dingil tipine (tekli, ikili, üçlü) göre dingil yükü dağılımı geliştirilir. Ayrıca, plak ayırıtından yapılan yanal ötelemelerin de dikkate alınması gerekir.

Dingil yükü dağılımları; her bir zaman aralığı için plak yüzeyindeki maksimum enine eğilme gerilmesini hesaplamak üzere tepki modelinde kullanılır.

Maksimum eğilme gerilmeleri (σ_{ij}) ve eğilme dayanımı; aşağıdaki ilişkiyi kullanarak her bir zaman artışı için (i) her tasarım tekerlek yüklemesinden (j) kaynaklanan agregalar arası kenetlenmedeki yıpranma ve izin verilebilir dingil yükü uygulamalarının sayısını (N_{ij}) hesaplanmasında kullanılmaktadır:

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \cdot \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2} - 1 \quad (8.67)$$

N_{ij} = j magnitütlü yüklerden kaynaklanan zaman artımı boyunca yük uygulamalarının izin verilebilir sayısı.

MR_i = i yaşındaki portland çimentosu betonu kopma modülü, psi.

$\sigma_{i,j}$ = i zaman artırımındaki j magnitütlü yükten kaynaklanan uygulanan gerilme

C_1 = kalibrasyon sabiti = 2.0.

C_2 = kalibrasyon sabiti = 1.22.

Tüm tasarım tekerlek yükleri ve tüm trafik artışları nedeniyle oluşan yorulma hasarı; Miner'in hasar hipotezlerine göre tüm tasarım periyodu boyunca oluşan hasarı toplayarak aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$FD = \sum \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \quad (8.68)$$

FD = plaktaki kritik yorulma lokasyonunda meydana gelen mevcut çatlak ralığı için tasarım ömrü boyunca birikmiş yorulma hasarı

n_{ij} = i^{th} trafik yüklemesi boyunca gelişen j^{th} magnitündeki uygulanan dingil yükü sayısı

N_{ij} = portland çimentosu betonunda çatlak başlangıcındaki, i^{th} trafik yüklemesi boyunca gelişen j^{th} magnitündeki uygulanan dingil yükü sayısı

i = zaman artış analizleri sayısının karşısı

j = yük magnitüdünün karşısı

11. Adım: Zımbalama Etkisinin Belirlenmesi:

Toplam hasar hesap edildikten sonra, mil başına ortalama zımbalama etkisi sayısı, 8.47 denkleminde verilen ulusal olarak kalibre edilmiş model kullanılarak tahmin edilir.

Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılardaki Zımbalama Etkisi İçin Tasarım Güvenilirliği

8.47 denkleminde verilen zımbalama etkisi modeliyle tasarlanan sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, %50'lik tasarım güvenilirliğine sahip olacaktır. Yani, tasarım ömrünü tamamlandıktan sonra olabileceği gibi tasarım ömrü tamamlanmadan önce de başarısızlık olasılığını göstermektedir. Tasarım amaçları için, %50'den daha yüksek güvenilirlik normal olarak belirlenebilecektir. Bu şartlarda tahmin edilen zımbalama etkisinin, arzu edilen güvenilirlik seviyesini sağlamak için yukarı yönde ayarlanması gerekir. Verilen herhangi bir güvenilirlik seviyesinde tahmin edilen ortalama zımbalama etkisinin ayarlanması için kullanılan denklemler aşağıda verilmektedir:

$$PO_R = PO + Z_R S_P \quad (8.69)$$

PO_R = R güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen zımbalama sayısı, no/mil.

PO = ortalama zımbalama etkisi sayısındaki artımlı aylık değişim, no/mil.

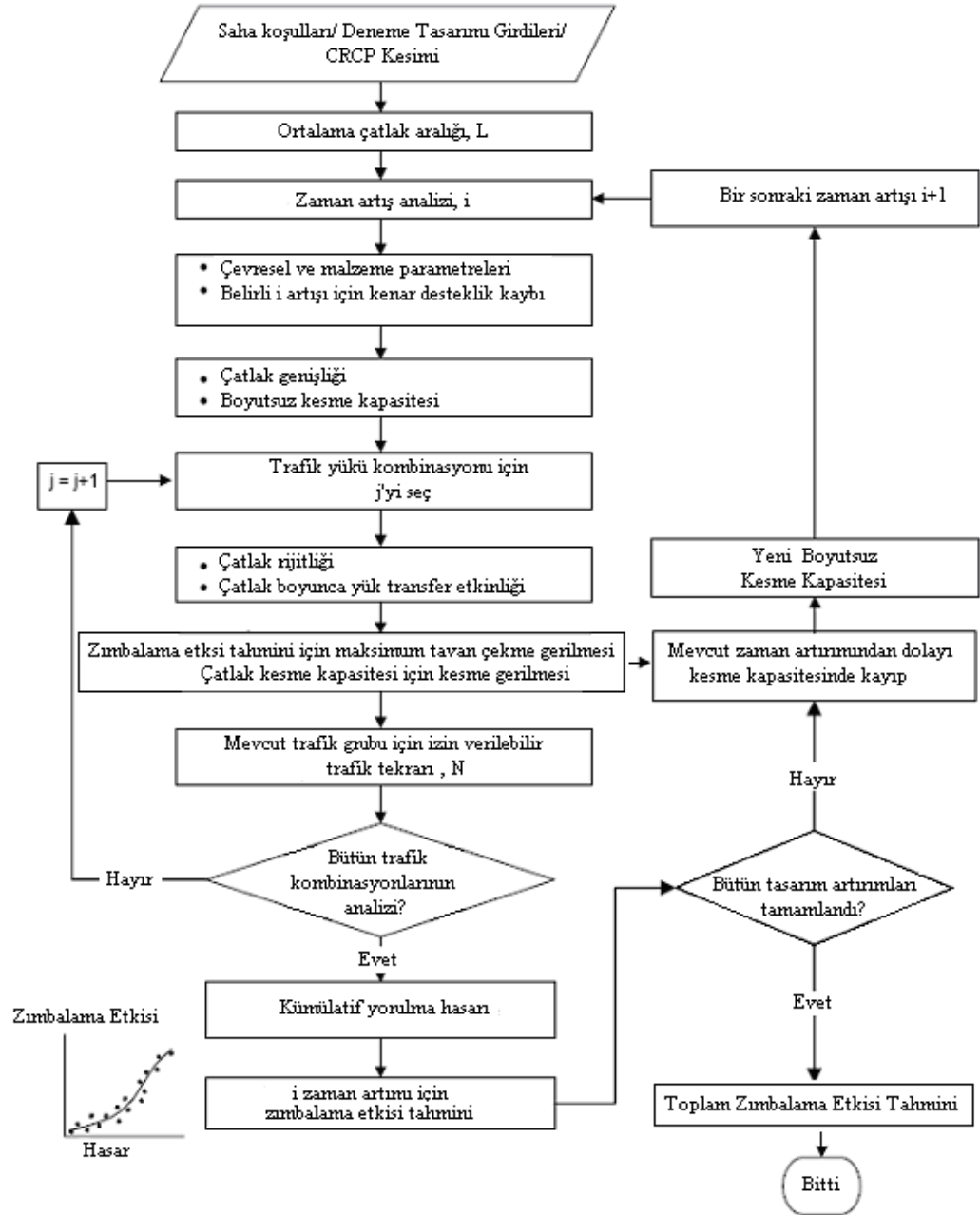
Z_R = verilmiş R güvenilirlik düzeyi için standart normal sapma

S_P = tahmin edilen ortalama zımbalama etkisi düzeyindeki PO 'nun standart sapması, no/mil.

$$S_P = 4.04 * PO^{0.3825} \quad (8.70)$$

8.70 formülü yerel kalibrasyona dayalı olarak değiştirebilir. Şekil 8.51 ve 8.52 (iki farklı sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı projesi) arttırılan güvenilirlik seviyesinin tahmin edilen zımbalama etkisi sayısında artışla sonuçlandığını göstermektedir. Bu, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım ömrü sonundaki zımbalama etkisi

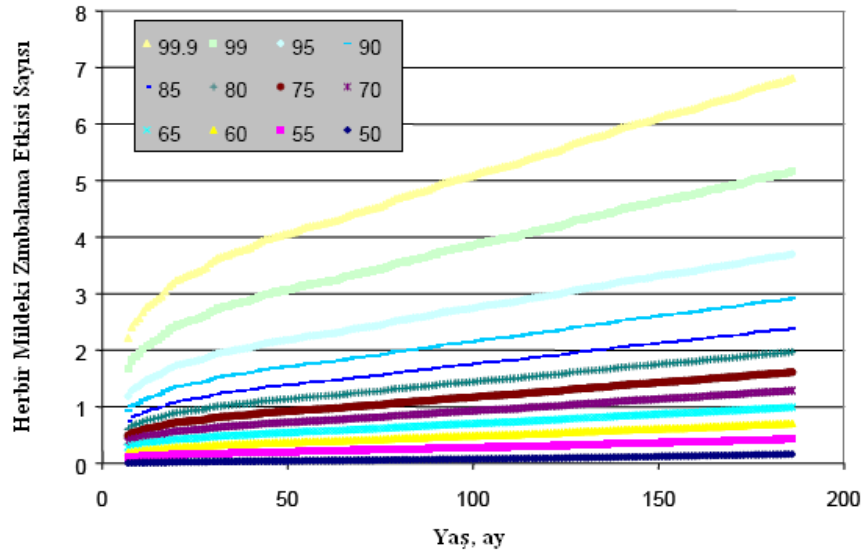
performans kriterini karşılayacağı güvenilirliği arttırmak için tasarım değişikliğine ihtiyaç duyulabileceği anlamına gelir.



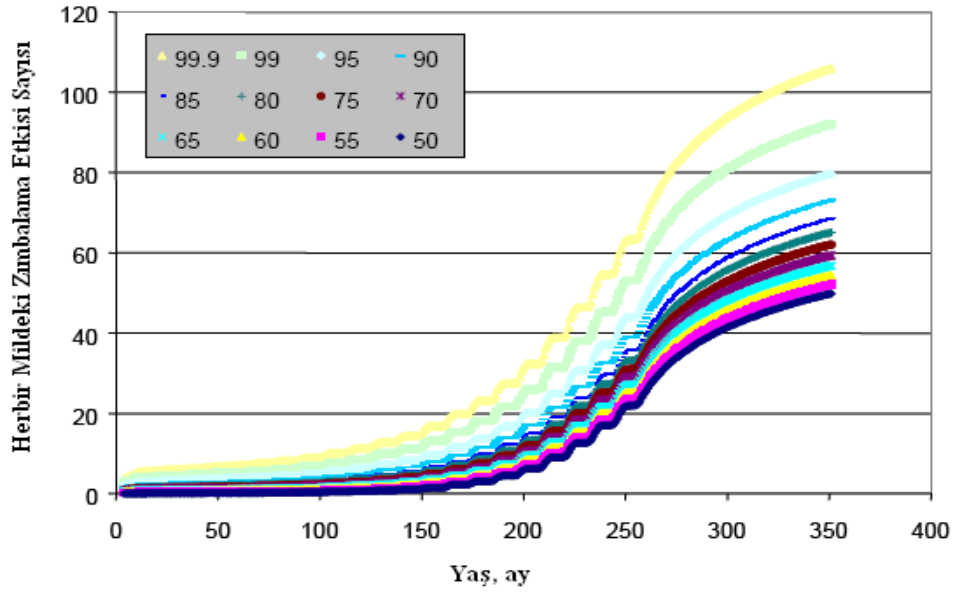
Şekil 8.50: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi tahmin algoritması [15]

Tablo 8.13: Analiz periyot aralıklarıyla değişen girdi parametreleri [15]

Girdi Parametresi	Değişim için Temel Esas	Düşünülen Varyasyon
Yük uygulama sayısı	Trafik, tasarım periyodu ve iklimsel varyasyonlar boyunca artış gösterir.	Aylık değişim
Sıcaklık Gradiyenti	Portland çimentosu betonu tabakasındaki sıcaklık koşullarındaki değişimler	Saatlik değişim
Çevresel bağıl nem	Nem koşullarındaki iklimsel değişimler	Yılın her bir ayı için ortalama değer
Taban zemini modülü	Nem ve sıcaklık koşullarından dolayı taban zemini rijitliğindeki iklimsel değişimler	Yılın her bir ayı için ortalama değer
Üstyapı desteklik koşulları	Tasarım periyodu boyunca erozyondan dolayı desteklikteki kayıp	Aylık değişim
Çatlak yük transfer etkinliği	Agregalar arası bağlantıdaki artan yıpranma	Aylık değişim
Beton dayanımı	Tasarım periyodu boyunca artan dayanım kazancı	Aylık değişim
Enine çatlak genişliği	(1) Sürekli kuruma büzülmesinden dolayı zamanla artan açılma (2) Aylık / iklimsel varyasyon (sıcaklık ve nemin fonksiyonu olarak)	Aylık değişim



Şekil 8.51: Zımbalama etkisi üzerinde tasarım güvenilirliğinin etkisinin gösterilmesi (1.proje) [15]



Şekil 8.52: Zımbalama etkisi üzerinde tasarım güvenilirliğinin etkisinin gösterilmesi (2.proje) [15]

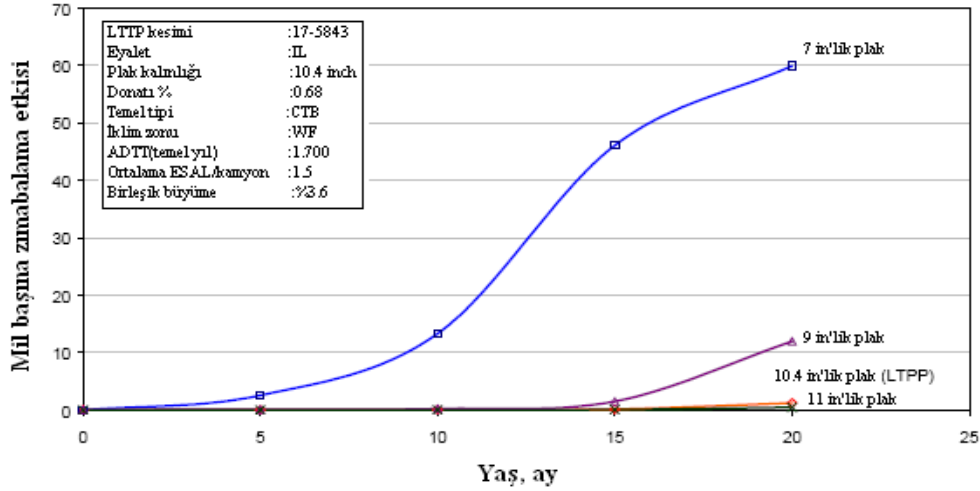
Zımbalama Etkisinin Azaltılması İçin Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapı Tasarım Özelliklerinin Modifikasyonu

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tasarım süreci, deneme tasarımının seçilimini gerektirir. Bu tasarım daha sonra analiz edilip, zımbalama etkisi ve pürüzsüzlük (IRI) tasarım ömrü süresince tahmin edilir. Eğer bu tahmin tasarım kriterlerini aşarsa, deneme tasarımı değiştirilmelidir. Çatlak genişliğiyle ilgili çatlak aralığı, rijit plak kalınlığı ve zayıf desteklik koşulları, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların performansını ve zımbalama etkisi gelişimini etkileyen en önemli faktörlerdir. Aşağıdakiler zımbalama etkisi oluşumunun azaltılmasına yönelik tasarım özelliklerinin potansiyel modifikasyonlarını özetlemektedir.

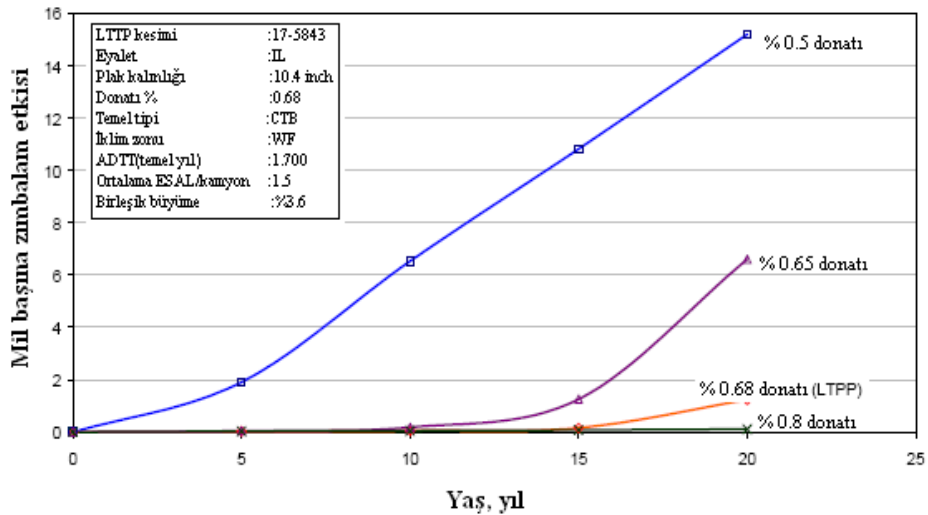
- **Plak kalınlığının arttırılması.** Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların plak kalınlığındaki artış; 1) plağın üst yüzeyindeki çekme gerilmesinde bir azalmaya, 2) aynı çatlak genişliğinde yüksek bir yük transfer etkinliğini sürdürebilecek ve aynı zamanda plak yüzeyindeki çekme gerilmesini azaltabilecek daha yüksek bir toleransa ve kesme kapasitesindeki artışa, ve 3) kesme kapasitesindeki artışa dayalı olarak zımbalama etkisini azaltacaktır. Şekil 8.53 zımbalama etkisinin gelişiminde plak kalınlığının önemli etkisinin bir örneğini göstermektedir.

- **Boyuna donatı yüzdesinin arttırılması.** Donatı içeriğindeki artışın çatlak aralığını azaltacak olmasına rağmen, sıkı bir şekilde kapalı olan çatlak formu ve

azaltılan yük transfer etkinliği kaybı nedeniyle tüm zımbalama etkisi sayısında büyük miktarda düşme görülmüştür. Şekil 8.54, zımbalama sayısındaki artışta donatı yüzdesinin önemli etkisini göstermektedir.



Şekil 8.53: Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda farklı plak kalınlıkları için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı [15]



Şekil 8.54: Farklı kesimlerdeki çeşitli boyuna donatı yüzdeleri için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı [15]

- **Donatı Derinliğinin Azaltılması.** Donatının üstyapı yüzeyine daha yakın yerleştirilmesi çatlakları daha yakın tutarak zımbalama etkisi olasılığını azaltır. Şekil 8.55 zımbalama etkisi sayısı üzerinde donatı derinliğinin etkisine ait bir örneği göstermektedir.

- **Portland Çimentosu Betonu Dayanımının Arttırılması.** Portland çimentosu betonu dayanımının arttırılması portland çimentosu betonunda daha düşük yorulma

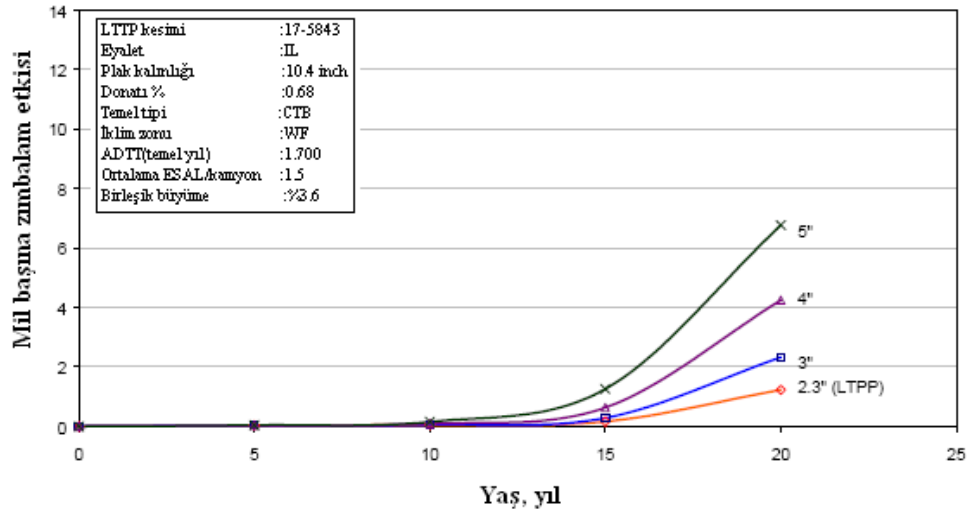
hasarıyla sonuçlanacaktır. Şekil 8.56 portland çimentosu betonunun eğilme dayanımının zımbalama etkisi gelişimi üzerindeki nispi etkisini göstermektedir. Buna rağmen; dayanım artışı çimento içeriğinin artırılması ile kazanılıyorsa, bu durum artan termal genleşme katsayısı- α_{PCC} ve rötre ile sonuçlanır.

- **Termal Genleşme Katsayısının Azaltılması.** Termal genleşme katsayısının azaltılmasıyla, aynı çatlak aralığı için betondaki çatlak genişliği azaltılacaktır. Şekil 8.57; portland çimentosu betonunun termal genleşme katsayısının zımbalama etkisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Tasarım karışımının optimize edilmesi zımbalama etkisi sayısında azalmaya yol açabilir.

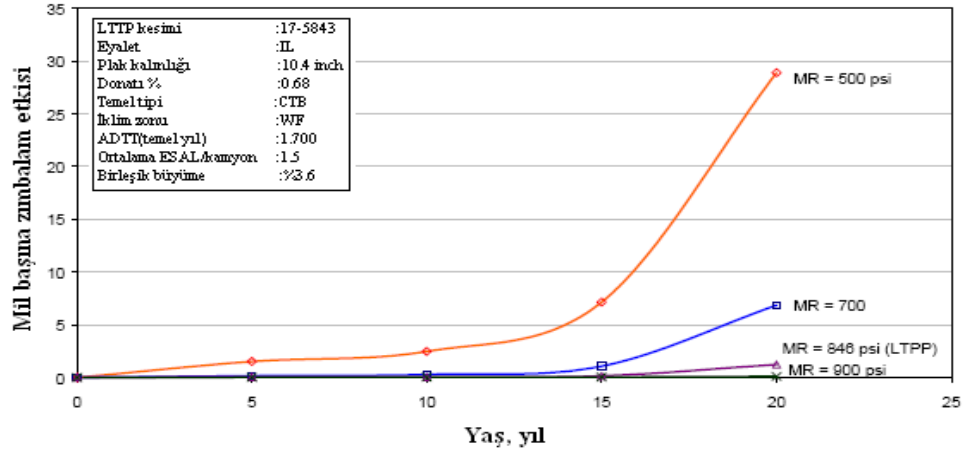
- **Maksimum Agregat Boyutunun Arttırılması.** Daha büyük boyuttaki agregaların kullanılması, agregalar arası kentlenme sistemini geliştirir.

- **Erozyon Dirençli Temel Tabakasının Sağlanması.** Güçlü ve erozyon dirençli temel sistemi kullanımı daha uniform ve yapısal yeterliliğe sahip bir destek sağlayacaktır. Yüksek sürtünme katsayısına sahip temellerin kullanımı ortalama çatlak aralığını azaltarak daha sıkı çatlakların oluşmasını sağlar.

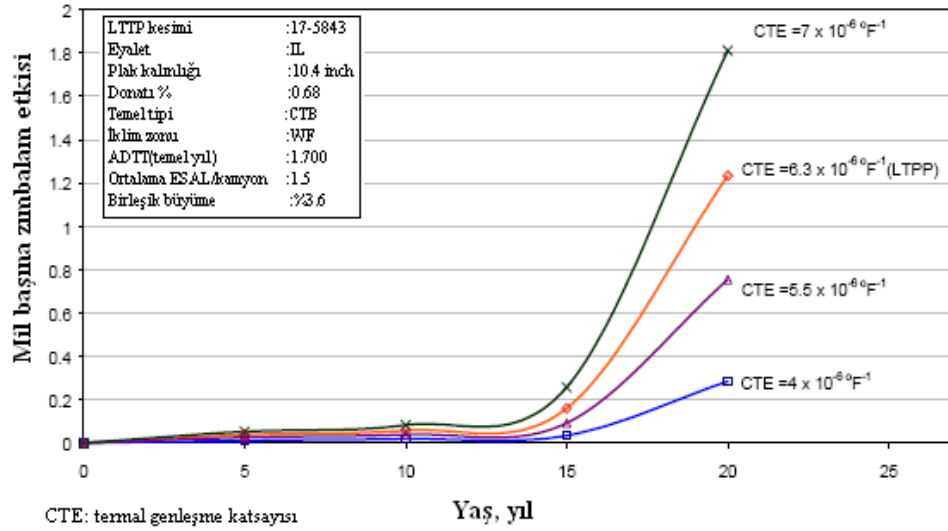
- **Kalıcı kıvrılma/çarpılmaların minimize edilmesi.** Kalıcı kıvrılma/çarpılmaların magnitudü zımbalama etkisi sayısının gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



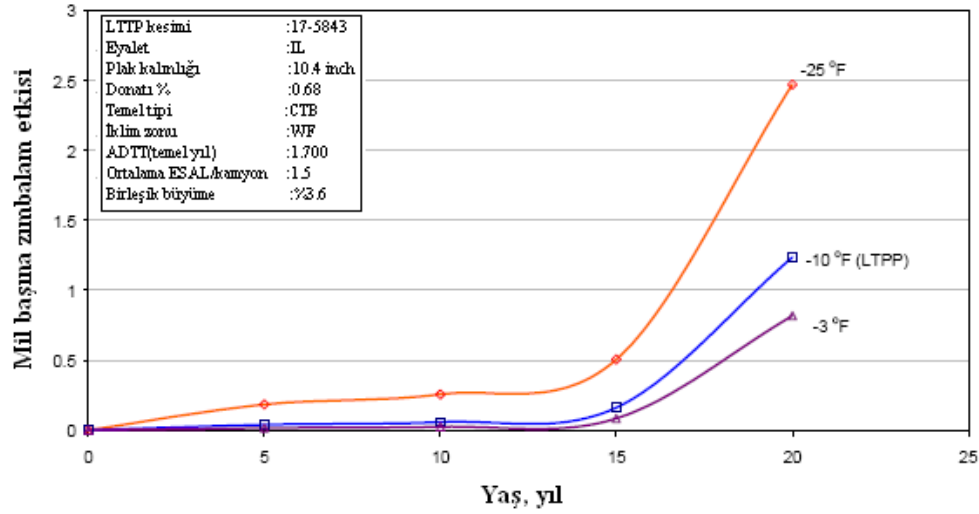
Şekil 8.55: Farklı donatı derinlikleri için tahmin edilen zımbalama etkisi sayısı [15]



Şekil 8.56: Farklı beton kopma modülüne sahip kesimler için tahmin edilen zımbalama etkisi (artırılmış rötre veya α_{pec} 'yi yansıtmaz) [15]



Şekil 8.57: Farklı portland çimentosu betonu termal genişleme katsayıları için tahmin edilen zımbalama etkisi [15]



Şekil 8.58: Kalıcı kıvrılma / çarpılma efektif sıcaklık gradientleri için tahmin edilen zımbalama etkisi [15]

8.7.4 Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Düzgünlüğü

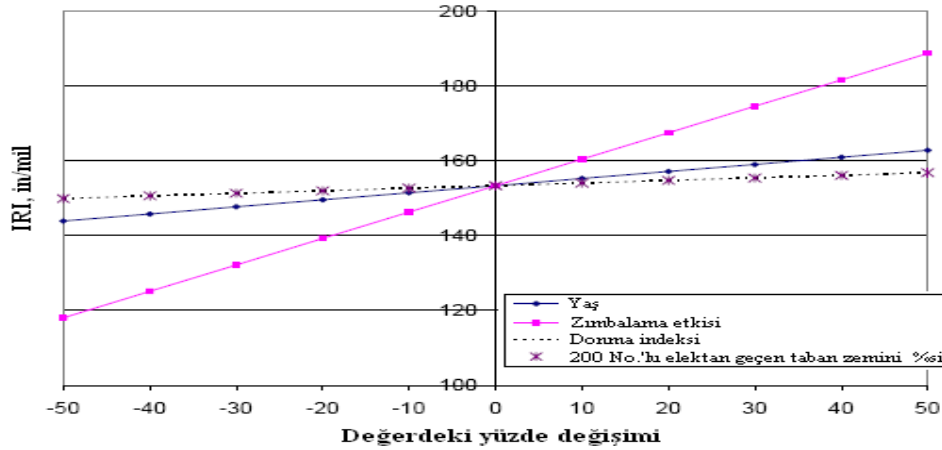
Sürücüler için, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların pürüzsüzlüğü, en kritik değerlendirmedir. Tipik bir karayolu üstyapısı rehabilitasyon veya restorasyon gereksinimi duyuncaya kadar, zamanla düzgünlüğünü kaybeder. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda, zımbalama etkisi aşırı düzeye ulaşmadıkça, düzgünlük herhangi bir sorun oluşturmaz. Örneğin, LTPP'nin dahilindeki sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, uzun yıllar boyunca çok düşük bir IRI göstermiştir. Dolayısıyla, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların, tasarım süreci boyunca, istendiği gibi performans göstermesini garanti altına almak için, düzgünlük konusunda limitlerin konulması arzu edilir. Kritik düzgünlük seviyesi, yolu kullananların sürüş kalitesi konusunda yaptıkları değerlendirmelere dayalı olmalıdır.

Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapı Düzgünlüğünü Etkileyen Faktörler

Tasarım Rehberindeki sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı düzgünlüğü yaklaşımı, başlangıçtaki düzgünlük, zımbalama etkisi ve saha şartlarına bağlı tahmin edilir. Zımbalama etkisi sonuçları ve bazı saha faktörleri, örneğin, 200 nolu elekten geçen taban zemini malzemesi yüzdesi ve donma endeksi, Şekil 8.59'da sunulmakta ve aşağıdaki paragrafta tartışılmaktadır.

Zımbalama Etkisinin Sonucu

Düşük derecedeki zımbalama etkileri; birbirine yakın iki enine çatlak (genellikle 2 ft'den (0.6 m) kısa), boyuna kısa çatlak, banket ayrıtı veya boyuna bir derzle çevrili alan olarak açıklanmaktadır. Şişme, ayrılma ve kırılma şeklinde gösterilen “Y” çatlakları da, zımbalama olarak tanımlanmaktadır. Orta ve yüksek dereceli zımbalama etkileri, ciddi şekilde şişmiş ve kırılmış olanlardır ve zımbalama etkisi alanı içindeki beton dağılmış yada parçalara ayrılmıştır.



Şekil 8.59: Aşırı yüklemeler sonucu oluşan bozulmaların ve saha değişkenlerinin sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki etkisi [15]

Bu durum, asfalt betonu yüzeyinde oldukça yıpranmış alanların oluşmasına yol açarken, diğer taraftan, yol yüzeyinin pürüzsüzlüğünü kaybetmesine neden olur. Zımbalama etkisi altındaki alanlar, aşırı şekilde yıpranmadan önce, sıklıkla, yamanır. Şekil 8.59, üstyapı düzgünlüğü konusunda, zımbalama etkisi sayısındaki artışın etkilerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, tahmin edilen IRI, her mil başına düşen zımbalama etkisi sayısına karşı çok hassastır.

Üstyapı Saha Koşullarının Etkisi

Üstyapı saha koşullarının sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların düzgünlüğü üzerindeki etkisi, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların üzerindeki etkisi ile benzerdir. Şekil 8.59, buzlanma indeksi ve taban zemini malzemesinin inceliğinin tahmin edilen sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı pürüzsüzlüğü üzerindeki etkisini göstermektedir.

Düzgünlüğün Tahmin Edilmesi

Düzgünlük, ilk inşa profili ile zamanla boyuna profilde oluşan değişimlerin ve trafik kombinasyonunun bir sonucudur. Bu değişimler pek çok nedenden kaynaklanabilir fakat belli üstyapı bozulmalarının artışı, düzgünlüğü son derece etkileyecektir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için IRI'yı etkileyen en önemli bozulma, zımbalama etkisi ve enine çatlakları kapsar. Bundan dolayı, düzgün üstyapı inşası ve sonrasında oluşacak bozulmaların önlenmesi, önemli bir tasarım hedefidir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için IRI modeli aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$IRI_M = IRI_I + C_1 \cdot PO + C_2 \cdot SF \quad (8.71)$$

IRI_I = başlangıçtaki, in/mil.

PO = her şiddet düzeyindeki zımbalama etkisi/mil sayısı (düşük, orta, yüksek)

SF = saha faktörü

$$= AGE \cdot (1 + 0.556FI) \cdot (1 + P_{200}) \cdot 10^{-6}$$

AGE = üstyapı yaşı, yıl.

FI = donma indeksi, $^{\circ}F$ gün

P_{200} = #200 no'lu elekten geçen taban zemini malzemesi yüzdesi.

$$C_1 = 3.15$$

$$C_2 = 28.35$$

İstatistik modelleri:

$$R^2 = 0.60$$

$$SEE = 14.6 \text{ in/mil (0.2 mm/m)}$$

$$N = 94$$

Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapıların Düzgünlük Güvenilirliği

8.71 formülüyle verilen, tahmin edilmiş sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı düzgünlüğü, % 50'lik tasarım güvenilirliğine sahiptir. Verilen her hangi bir güvenilirlik seviyesinde tahminlenen ortalama düzgünlüğün ayarlanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmektedir.

$$IRI_R = IRI_M + Z_R \cdot STD_{IRI} \quad (8.72)$$

IRI_R = R güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen IRI, yüzde, in/mi.

IRI_M = %50 güvenilirlik düzeyindeki tahmin edilen IRI, in/mi.

Z_R = verilen R güvenilirlik düzeyi için standart normal sapma.

STD_{IRI} = tahmin edilen IRI düzeyine uygun standart sapma, in/mi.

$$STD_{IRI} = \left(Var_{IRI} + C1^2 \cdot Var_{PO} + S_e^2 \right)^{0.5} \quad (8.73)$$

Var_{IRI} i = başlangıçtaki IRI varyansı (LTTP'den elde edilen) = 29.16 (in/mi)²- (0.007 (mm/m)²).

Var_{PO} = zımbalama etkisi varyansı [formül 8.70] (No./mi)².

S_e^2 = tüm model hatalarının varyansı = 213.2 (in/mi)²- (0.05 (mm/m)²).

8.73 denklemi, yerel kalibrasyona bağlı olarak değiştirilebilir.

Düzgünlüğün Geliştirilmesi İçin Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapı Tasarımının Modifikasyonu

Deneme tasarımı, tasarımcı tarafından seçilen performans kriterlerini karşılayamayan bir IRI ortaya koyduğu zaman, deneme tasarımı, daha düşük bir IRI değerine göre değiştirilebilir. Bunu gerçekleştirmek üzere kullanılacak en etkin yöntemlerden bazısı, aşağıdaki gibidir:

- **Üstyapının çok düzgün inşası.** Pürüzsüz bir üstyapı inşa etmek üzere ciddi teşvikler öneren düzgünlük şartnameleri, pek çok eyalet'de standarttır. Bu şartnameler, pek çok yıllık uygulama dönemi boyunca ortalama IRI değerinin düşürülmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bundan dolayı, düzgün bir üstyapının inşa edilebileceği bilinmektedir. Bu , kullanıcılara, daha uzun dönemde daha pürüzsüz bir üstyapı sağlayacaktır.
- **Zımbalama etkisinin minimize veya elimine edilmesi.** Düzgünlük tahmin modeli, düzgünlük kaybının zımbalama etkisi gelişimindeki artıştan kaynaklandığını göstermektedir. Zımbalama etkisi, oldukça önemli

olabilmektedir. Zımbalamayı etkileyen tüm faktörler, bunların oluşumunu minimize etmede farklılık gösterebilir. Özellikle, küçük çatlak genişliklerinin sürdürülebilmesi, önemlidir.

8.8 Özel Yükleme Koşulları

Tasarım kılavuzu yazılımdaki trafik girdileri; kamyon tipi, tekerlek ve dingil düzenlemelerine ait geniş bir kavram sunmaktadır:

- 10 farklı araç tipi (sınıf 4-13).
- Dingiller arasında (çoklu aks düzenlemeleri için) değişken aralıklı tekli, ikili, üçlü ve dördümlü akslar.
- Çiftli lastik veya tekli lastik .
- Değişken lastik basıncı.
- Direksiyon ve sürüş dingilleri arasındaki tanımlanabilir kamyon traktör dingil aralığı.

Normal tasarım koşulları, büyük ölçüde değişen ağırlıklara sahip, geniş karışım ve yelpazede tekli, ikili, üçlü ve dördümlü aksların değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bununla birlikte, trafik veri girdileri de, yukarıda açıklanan belirli aks ağırlıkları ve lastik düzenlemeleriyle tek bir özel araç tipi (10 araç tipi mevcuttur) ile analiz yapacak tasarımcıya olanak sağlamaktadır. Örneğin, bir kullanıcı, 16 kips ağırlığında tekli bir dingili ve 145 psi lastik basıncı, süper tek lastikli, 100000 pound'luk ağırlığa sahip üçlü dingile sahip kamyon etkisini analiz edebilir.

Tasarım Rehberi yazılımı, temel trafik diyalog kutucukları içinde, açık bir şekilde tanımlanan trafik hacmi, dingil açıklığı, dingil dağılımı, lastik basıncı ve araç dağılımıyla, ya ayrı olarak ya da diğer araçların bir kombinasyonu olarak, özel araçları da değerlendirebilmektedir.

Örneğin, ayrı bir şekilde analiz edilen özel bir araç (yaklaşık Sınıf 7 düzenlemesine giren), aşağıdaki gibi modellenebilir:

- Araç için, trafik diyalog kutucuğuna girdikten sonra hacim değeri girilir.

- Araç Sınıfı Dağılımını içeren Trafik Hacmi Düzeltme Faktörlerini diyalog kutucuğuna girip, arzu edilen yüzdesel değerleri (örneğin, %100 araç Sınıfı 7) ayarlanır.
- Dingil Yüğü Dağılım Faktörlerini diyalog kutucuğuna girip, uygun tekli, ikili, üçlü ve/veya dörölü dingiller, arzu edilen araç dingil ağırlıkları için %100'e göre ayarlanır.
- Dingil/Kamyon sayısı diyalog kutucuğuna girip, özel araçlar dışında (örneğin, Sınıf 7) tüm araçlar için sıfır girildikten sonra her bir dingil için ve özel araç için, uygun ortalama dingil/kamyon değerleri girilir.
- Dingil Düzenlemesi ve Dingil Açıklığı diyalog kutucuğuna girilip, araç için uygun değerleri girilir.

Rijit ve esnek üstyapıların her ikisini de kapsayan bu yöntemin kullanılmasının avantajları, bu özel aracın, trafikteki diğer araçlarla birlikte doğrudan doğruya kombine edilebilip, modellenenebilmesidir.

Eğer tamamıyla standart dışı bir dingil düzeneğinin analizine gereksinim duyulursa, aynı gerilme ve sapmayı verecek olan eşdeğerlikteki tekli, ikili, üçlü veya dörölü dingillerin belirlenmesi için, şöyle bir analize gerek duyulur:

1. Standart dışı dingil ve lastik düzeni için, rijit plak yüzeyi ve tabanındaki kritik eğilme gerilmelerini veya rijit plak köşe defleksiyonlarını hesaplamada, sonlu eleman analizi uygulanır.
2. Aynı kritik gerilmeyi (veya defleksiyonu) gösteren standart tekli, ikili, üçlü veya dörölü dingil belirlenir.
3. Standart dışı dingilin neden olduğu hasar, ya (a) eşdeğer standart aksların ilave geçiş sayısını normal dingil dağılımlarına ekleyerek veya (b) sadece özel bir aracı dikkate alarak, analiz edilebilir.

Eğer farklı denklik tabanları (gerilme veya defleksiyon), farklı eşdeğer aks yüklemeleri verirse, o zaman derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için yapılan çatlama ve kırılma analizleri, ayrı ayrı yapılabilir.

8.9 Yerel Koşullara Göre Kalibrasyon

Bu rehberde açıklanan tasarım süreçlerini benimseyen bir kurum, uygulamalı bir uygulama planı yapmalıdır. Plan, tüm departmanların desteğinin alınmasını, tüm girdilerin elde edilebilmesi için prosedürlerin seçimini ve girdiler için yerel ve önceden tanımlanmış verilerin ortaya konulmasını, teknik personelin eğitimini, gerekli ekipmanlar ile gerekli bilgisayar donanımlarının edinilmesini ve yerel koşullara uygun kalibrasyon/doğrulama süreçlerini içermelidir.

Bu rehberdeki mekanistik-ampirik prensiplere dayalı olan tasarım süreci, hem tasarım yaklaşımında hem de karmaşık teknik ayrıntılarda, var olan tasarım işlemlerinden (örneğin, AASHTO, 1993) ayrılan önemli gelişim ve örneği temsil etmektedir. Üstyapının/tabana zemininin hem yapısal olarak hem de iklimsel olarak (ısı ve nem) modellenmesinde mekanistik ilkelerin kullanımı, böyle bir modeli işletebilecek (dingil yük dağılımını, geliştirilmiş malzeme özelliklerini, inşaat faktörlerini ve çevre sıcaklığı, yağışı, solar radyasyonu, bulut örtüsünü ve nispi nemlilik gibi saatlik iklimsel verileri içeren) çok daha kapsamlı bir veri girişine gereksinim gösterir. Bundan dolayı, karayolları kurumunun, prosedürlerin düzenlenmesi değerlendirilmesi için önemli bir çaba göstermesi gerekecektir. Bu çabalar, önceki deneyimler sonucu önemli oranda değişken olan tasarımlardan bile (örneğin çok daha ağır trafik); güvenilirlik ve maliyet açısından çok daha yeterli olan tasarım prosedürlerini ortaya çıkaracaktır..

Önemli olan; ilk olarak 1962 yılında yayımlanan AASHTO tasarım prosedürlerinin bile, eyalet karayolu kurumlarınca ihtiyaç duyulan uygulama planı nedeni ile birkaç kez yenilendiğinin göz ardı edilmemesidir. Bu karayolu kurumları, uygun girdilerin elde edilmesi (ortalama portland çimentosu betonu modülü ve eğilme dayanımı gibi), “bölgesel” veya iklimsel faktör gibi parametreler için elde edilen kalibrasyon değerlerinin uygulanması, taban zemini destekliği ve bunun bilinen laboratuvar testleri ile korelasyonu, eşdeğer tekli dingil yüklemelerinin hesaplanmasına yönelik trafik girdileri ve diğer pek çok faktör üzerinde odaklanmıştır. Buna ek olarak, pek çok kurum, yerel koşullara göre tasarım prosedürlerini kalibre etmek için 10 veya daha fazla yıl gözlemlenen test kesimleri kurmuşlardır. Bugünün standartlarına göre nispeten basit bu prosedür bile, Eyalet karayolları kurumlarınca yapılan başarılı uygulamalar için uzun yılları gerektirmiştir.

8.9.1 Yerel Koşullara Uygun Kalibrasyon Gereksinimi

Çok açıktır ki, mekanistik-ampirik Tasarım Rehberi prosedürü, faydalı bir tasarım prosedürünün başarıyla uygulanımı için daha büyük çabalar gerektirecektir. Kalibrasyon yapılmadan, mekanik hesaplamaların (yorulma hasarı ve diferansiyel enerji) sonuçları; rijit plak çatlamlarının, derz bozulmalarının, çatlak genişliğinin veya zımbalama etkisinin tahmin edilmesinde kullanılamaz. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda plak çatlağı için, direkt üstyapı tepkilerinin (defleksiyon, gerilme veya birim deformasyon) hiçbiri, “hasar” doğuran çatlama mekanizmasını modellemek için oldukça karmaşık algoritmalar gerekeceği için, çatlak gelişiminin oranının tahmin edilmesinde kullanılamaz. Bu hasar, sahadaki gerçek çatlama ile ilişkilendirilmelidir. Aslında, bozulma mekanizması, uygulanabilir bir modellemeden çok daha karmaşıktır; dolayısıyla, ampirik faktörlerin kullanımı ve kalibrasyon, gerçekçi performans tahminlemeleri için gereklidir.

Tasarım Rehberi, üstyapıların yapısal tasarımı için, temel dayanak sağlayan mekanistik mühendislik prensiplerine, büyük ölçüde, dayanmaktadır. Derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarım prosedürleri, Kuzey Amerikanın önemli bir kısmında yerleştirilmiş olan kesimleri kapsayan ulusal LTPP veritabanından elde edilen tasarım girdileri ve performans verilerini kullanarak, kalibre edilmektedir. Bozulma modellerinin kalibrasyonu, şunları kapsamaktadır:

- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların derz bozulmaları.
- Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılarda enine çatlama.
- Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarda zımbalama etkisi (sınırlı çatlak genişliği kalibrasyonu ile).

Bu kalibrasyon çabası, ulusal kalibrasyon sabitli bozulma tahmin modelleriyle sonuçlanan yinelemeli çalışmalardır. Kalibrasyon eğrileri, genellikle, LTPP veritabanındaki sürekli donatılı ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların ve diğer ulusal verilerin ulusal performansını temsil etmektedir. Bu kalibrasyon verileri içinde her ne kadar sapma varsa, bozulma tahmin modelleri içine doğal olarak taşınmıştır. Ulusal kalibrasyon, ülkenin bazı bölgeleri için tamamem yeterli olmayabilir, bu durumda, yerel ve bölgesel kalibrasyona gerek duyulabilir.

Derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların her ikisi için de hazırlanan IRI modelleri, doğal olarak ampiriktir ve her bir üstyapı ailesi (sürekli donatılı ve

derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar) için mevcut LTPP verilerinden, doğrudan doğruya geliştirilmiştir. Yerel bir kurum için başka doğrulama süreçlerine gerek duyulabilir ama bu kısımda açıklandığı gibi, arzu edilirse, başarılabılır.

8.9.2 Kalibrasyon Yaklaşımı

Bu tasarım prosedürü, mekanistik ilkelere dayandığı için, prosedürler, analitik prosedürün ve kalibre edilmiş performans verilerinin ait olduğu alan içinde makul bir şekilde çalışmalıdır. Bununla birlikte, bu süreç çok karmaşık bir prosedür olup, uygulamak isteyen karayolları kurumu tarafından dikkatle değerlendirilmelidir. Aşağıda verilenler, rijit üstyapılar için bu mekanistik-ampirik tasarım prosedürünün uygulanmasını gerektiren, önerilmiş kalibrasyon/doğrulama çabalarıdır:

1. Tüm girdi verilerinin gözden geçirilmesi.
2. Duyarlılık analizinin yapılması.
3. Karşılaştırmalı çalışmaların yapılması.
4. Doğrulama/kalibrasyon çalışmalarının yapılması.
5. Önceden belirlenmiş girdilerin ve kalibrasyon sabitlerinin modifiye edilmesi.

Tüm Girdi Verilerinin Değerlendirilmesi

Tasarım Rehberi yazılımına göre, tüm girdiler, iki temel hedef akılda tutularak değerlendirilmelidir.

- Çeşitli tipteki tasarım projelerinin her bir girdisinin edle edilmesindeki prosedürün ve istenen düzeyin belirlenmesi. Tasarım Rehberi, üç girdi düzeyine olanak tanır ve her seviye, pek çok girdi için, farklı prosedürlere sahiptir.
 - Düzey 1 — zemin ve malzemenin labaratuvar testleri, FWD testi ve geri-hesaplama, ATC ve WIM (weigh-in-motion) gibi sahaya özel test verileri.
 - Düzey 2 — mevcut test prosedürleri veya korelasyon denklemlerinden elde edilen malzeme özellikleri ve bölgesel faktörler.
 - Düzey 3 — deneyimlere dayalı daha önceden belirlenmiş yerel değerler veya tipik yerel değerler.

Not: Bu Tasarım Kılavuzunda yer alan prosedürlerin kalibrasyonunda kullanılan mevcut LTPP verileri, tüm düzeylerin bir karışımıdır. Bazı girdiler oldukça kritiktir fakat iyi

tanımlanmamıştır ve bunlar, kurumun, aşağıda açıklandığı gibi, duyarlılık analizlerini yapmak zorunda olduğu girdilerdir.

- Tasarım Rehberi yazılımınca sağlanan varsayım değerleri, kurum için uygunsa aynen bırakılır fakat değilse modifiye edilir.
- Kurumun bulunduğu coğrafi alan içindeki (düşük hacimli, yüksek hacimli, eyalet içindeki farklı coğrafi bölgeler) çeşitli tipteki projeler için kabul edilebilir aralıktaki girdiler seçilir.
- Düzenli tasarım projeleri için girdilerin elde edilmesinde kullanılacak prosedürün seçilmesi. Sonuçlanan tasarımlar üzerinde, girdi değerlerinin doğruluğunun etkileri belirlenir.
- Belirli özel girdilerin (örneğin; farklı agrega tipleri için portland çimentosu betonu termal genleşme katsayısı, ortalama portland çimentosu betonu modülü, farklı üstyapı karışımları için kopma modülü, dingil tipleri için dingil yğk dağılımları), ortaya konulması için gerekli testler yapılması ve istenen bir test için ihtiyaç duyulan donanımları edinilmesi.
- Çeşitli tipteki karayolları (eyaletlerarası, birincil, ikincil) için arzu edilen tasarım güvenilirliğinin ortaya konulması için analizler yapılır. Tipik değerler, kılavuzda; BÖLÜM 1, Kısım 1’de verilmektedir fakat bu değerlerin her kurum tarafından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu işlem; tasarım güvenilirliği düzeyi aralığında, çeşitli projeler için yazılım kullanımını ve deneyimli mühendislerin her bir proje için doğru olduğuna inandıkları makul güvenilirlik düzeyinin gözden geçirilmesini gerektirir.

Duyarlılık Analizi

Her kurum, yeni tasarım prosedürünün duyarlılık analizini yapmalıdır. Bu analiz, tüm tasarım girdileriyle birlikte örnek bir tasarım durumu seçilerek yapılmalıdır. Yazılım çalıştırılıp, tasarım ömrü boyunca ortalama bozulma ve IRI tahmin edilir. Daha sonra, birbirinden ayrı her girdi normal olarak bir seferde, çeşitlenir ve tüm çıktılarıdaki değişim gözlemlenir. Uygun tablo ve grafikler hazırlanır ve sonuçlar değerlendirilir. Girdiler üç gruba ayrılabilir, örneğin:

1. Bir yada daha fazla çıktı üzerinde çok önemli etkiye sahip olanlar.
2. Bir yada daha fazla çıktı üzerinde orta derecede bir etkiye sahip olanlar.

3. Bir yada daha fazla çıktı üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olanlar.

1 nolu gruba ait olan söz konusu girdiler, tasarım üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olacaklarından, 3 nolu gruba dahil olanlara göre daha dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Yukarıdaki duyarlılık, girdiler üzerinde bir etkilerinin olup olmadığını anlamak için, düşük, orta ve yüksek trafik proje tasarımları için tekrarlanabilir.

Karşılaştırmalı Çalışmalar

Tasarım Rehberinden gelen tasarımlar, halen kurumlar tarafından kullanılan prosedürün sahip olduğu tasarımlarla karşılaştırılır. Tipik tasarım koşulları seçilir ve Tasarım Rehberi için, tasarım girdileri elde edilir. Yazılımı çalıştırılır ve analiz döneminde bozulmalar ve IRI belirlenir. Sonuçlara ve kurum performans deneyimine dayalı olarak, tasarımın yeterliliğini değerlendirilir. Tasarım rehberi tahminlerinde yetersizlikler varsa, eğer mümkünse, sebepleri belirleyin.

Yerel Koşullara Uygun Kalibrasyon

Ulusal kalibrasyon/doğrulama süreci, hem derzli donatısız ve sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar hem de pek çok portland çimentosu betonu rehabilitasyonu için başarıyla tamamlanabilmiştir. Bu çaba oldukça geniş kapsamlı olsa da, varolan prosedürlerden farklı olan yeni bir tasarım uygulamasında, bir tedbir adımı olarak, doğrulama süreci son derece tavsiye edilmektedir. Doğrulama veritabanı, kurumların karayolları sistemi içinde karşılaşılan inşaat, malzeme, iklim, trafik ve diğer koşullar için, ulusal kalibrasyon faktörlerinin veya fonksiyonlarının, yeterli ve uygun olduklarını teyit için geliştirilmelidir.

Kurum performans verilerine ait bir veritabanı hazırlanır ve bu “yerel” standartlarla, yeni tasarım prosedür sonuçlarını karşılaştırılır. Bu karşılaştırma, eyalet çevresindeki, en az, 20 derzli donatısız tipteki rijit üstyapıyı ya da 20 sürekli donatılı tipteki rijit üstyapının seçimini gerektirecektir. Eğer eyalet çok farklı iklimlere sahipse, bu işlem, her iklim kuşağında ayrı ayrı yapılmalıdır.

Kalibrasyon/doğrulama sürecinin amacı; performans modellerinin, üstyapı bozulmalarının ve sürüş kalitesinin, ulusal bir ölçekte, doğru bir şekilde tahminlenildiğini teyit etmektir. Belirli bir coğrafik alan için, ulusal modele göre yapılacak ayarlamalara, güvenilir üstyapı tasarımlarının elde edilmesine gereksinim duyabilir.

Kalibrasyonun/Girdilerin Modifiye Edilmesi

Kurumların, karayollarındaki bozulma ve IRI için, tahmin edilen ve ölçülen değerler arasında önemli farklılıklar bulunursa, kalibrasyon katsayılarına yönelik uygun düzeltmeler yapılmalıdır. Bu çalışma, önemli girdi parametreleri için arzu edilen doğruluk seviyesini ve varsayılan girdi değerlerini de belirleyecektir. Gereklikçe, yeni prosedüre yönelik değişiklikleri yapılması, yukarıdaki sonuç ve bulguların tümüne bağlıdır. Bu sonuçlar, daha sonra sık sık tartışıldığı gibi, minimum maliyetli bir tasarım ortaya koymak üzere, güvenilirlik tasarımında kullanılmak amacıyla yeni standart sapma modeli oluşturmak için kullanılabilir.

8.9.3 Performans Tahmin Modelleri

Tasarı Rehberi, derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı için, aşağıdaki üç performans modelini kapsamaktadır:

- Plak çatlamları (yorulma hasarından).
- Derz kırılması.
- Düzgünlük (IRI).

Aşağıdaki performans modelleri, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı için kullanılmaktadır:

- Zımbalama etkisi ve çatlak genişliği.
- Düzgünlük (IRI).

Plak Çatlamları (Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar)

Yorulma çatlağı, Tasarım Rehberindeki plak kalınlığı tasarımının temel ilkesidir. Çatlama hatası; yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya olmak üzere iki modda dikkate alınır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardaki yorulma çatlağını, pek çok faktör etkiler. Çatlama modelinin kalibrasyonu ve doğrulanması için, aşağıdaki faktörlerin değerlendirilmesi önemlidir:

- Portland çimentosu betonu özellikleri — çeşitli portland çimentosu betonu özellikleri, derzli donatısız tipteki rijit üstyapılardaki plak çatlamlarının

doğru modellenmesi için çok önemlidir. Daha önemli özelliklerden birkaçı sunulmaktadır.

- Termal genleşme katsayısı — kıvrılma gerilmesi, çatlama performansını etkileyen baskın bir faktördür. Doğru termal katsayı değeri, güvenilir sonuçların garanti altına alınmasında önemlidir. Testlerin, agrega tipleri için tipik değerlerin ve portland çimentosu betonu karışımlarının örnek değerlerinin belirlenmesi için yapılması gerekir. Test sonuçlarına dayalı olarak, tipik değer (tasarım karışımına ve agrega tipine dayalı olarak) kullanılmasının, yeterli olup olmadığına veya spesifik proje testine gerek olup olmadığına dair öneriler yapılabilir.
- Portland çimentosu betonu kırılma ve elastik modülü — ortalama dayanım ve modüller, inşa için gerekli olan minimum değer, gerekli girdilerdir. Daha önceki projelerden veya yeni laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçların, bu değerlerin veritabanının oluşturulmasında kullanılması gerekir. Zamanla artan dayanım ve modül kazanımı, yorulma hasarının artışlı olarak hesaplandığı için, çok önemlidir. Doğrulama çalışmalarına, portland çimentosu betonu dayanım kazanım modelini de doğrulayacak, bir test programı dahil edilmelidir. Portland çimentosu betonu dayanımındaki bir artışa, tipik olarak; hassas analiz sonuçlarının elde edilmesi için dikkate alınması gereken, elastik modüldeki, termal genleşme katsayısındaki- α_{PCC} , ve rötredeki artış eşlik eder. Test programına, portland çimentosu betonu dayanımı ve modülü arasındaki korelasyonun makul olduğundan emin olmak için modül testinin de dahil edilmesi gerekir.
- Portland çimentosu betonu rötresi — Kuru alanlarda bile portland çimentosu betonu içindeki bağıl nem %85 oranında sabit kalırken veya 2 inç veya daha derinde daha da yüksek değerlerde olabilirken, rijit üstyapı yüzeyi önemli ölçüde kuru olabilir. Nem koşullarındaki farklılık, kıvrılma gerilmelerini etkileyen önemli ölçüdeki plak çarpılmalarına neden olabilir. Test işleminin, kurum tarafından kullanılan, portland çimentosu betonu rötre özelliklerinin belirlenmesi için yapılması gerekir.
- Sıcaklık profilleri — rijit üstyapılardaki sıcaklık koşulları, 24-saat boyunca sürekli değişebilir. Hassas yorulma hasarı hesaplaması için, saat başı sıcaklık

profillerinin dikkate alınması, önemle vurgulanmaktadır. Tasarım rehberindeki, bu hesaplamalar, Ulusal Deniz ve Atmosferik Araştırma Dairesi tarafında halihazırda mevcut olan saat başı iklimsel verilere dayalı olarak, beton plaktaki sıcaklık profilini tahmin eden bir analitik model (Geliştirilmiş Entegre İklim Modeli [EICM]) kullanılarak, yapılabilir. Bu model, doğru sonuçlar verebilir fakat model tahminlerinin, gerçek sıcaklık profilleri ile eşleşmesini sağlamak için, yerel kalibrasyon son derece önemlidir. EICM kalibrasyonu, ölçülen sıcaklıkların eşlenmesi için, model parametrelerine (termal kondüktivite, ısı kapasitesi, yayıcılık) yönelik ayarlamaların yapılmasını kapsar.

- Kalıcı kıvrılma/çarpılma efektif sıcaklık farkı — inşaat sırasın ortaya çıkan beton içindeki sıcaklık gradientlerinin ve diferansiyel kalıcı rötrenin bir sonucu olarak; rijit plaklar, herhangi bir ısı gradienti olmadığında bile düz değildir. Tasarım Rehberindeki, efektif kalıcı kıvrılma/çarpılmanın büyüklüğü, ulusal kalibrasyon sonuçlarına dayalı optimizasyonla belirlenmiştir. Farklı kür prosedürleri ve inşaa sıcaklıkları için efektif kalıcı kıvrılma/çarpılmanın büyüklüğü, yerel alan çalışmaları ile belirlenebilir.

Derz Bozulmaları-Kırılmaları (Derzli Donatısız Tipteki Rijit Üstyapılar)

Kırılma, derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların sürüş kalitesini etkileyen önemli bir performans faktörüdür. Plak çatlamaları için hazırlanan tüm parametreler, kırılma performansına da uygulanabilir. Ek olarak, kırılma modeli için kalibrasyon ve doğrulama çalışması, aşağıdaki parametreleri kapsamalıdır:

- Kayma donatısı çapı – kayma donatısı çapı, kayma donatılı rijit üstyapıların kırılma performansını etkileyen oldukça dominant bir faktördür. Farklı boyutlardaki kayma donatılarıyla inşa edilen üstyapıların performansı, model tahminlerini kontrol ederken değerlendirilmelidir.
- Temel tabakası tipi — temel tabakası tipi ve kalitesi, özellikle kayma donatısız rijit üstyapılarda, kırılma performansını etkileyen önemli bir faktördür. Farklı temel tabakalarıyla inşa edilen rijit üstyapı performansı, model tahminlerini ve erozyon endeksini doğrulamak için değerlendirilmelidir.

- Derz açıklığı — derz hareketleri, Tasarım Rehberindeki kırılma modelinde önemli bir parametredir; buna rağmen, kırılma modeli, ölçümlenmiş değerler mevcut olmadığından, derz açıklık değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Doğrulama çalışması için kullanılan test programına, kalibrasyonda kullanılan değerlerin gerçekçi olduğunun teyidi için derz hareketlerinin gözlemlerinin dahil edilmesi gerekir. Portland çimentosu betonu sıfır-gerilme sıcaklığı ile gerçek portland çimentosu betonu plak sıcaklığı arasındaki fark, derz açıklığına yönelik etkileyici bir girdidir. Bu parametre ile ilgili yapılacak daha ileri doğrulama işlemleri, oldukça yardımcı olur.

Zımbalama Etkisi (Sürekli Daontılı Tipteki Rijit Üstyapılar)

Pratik olarak, plaka çatlamları ve derz kırılması konusunda rol oynayan tüm faktörler, sürekli doantılı tipteki rijit üstyapılar için de önemlidir. Özellikle, donatı derinliğinde tahmin edilen çatlak genişliği ve çatlak yük transfer etkinliği, iklim ve yerel kurumun elindeki mazemeler dahilinde, dikkatlice kontrol edilmelidir. Bu, yukarıdaki pek çok parametreye ve beton plak/temel sürtünmesine bağlı olan, çatlak aralığı tahminine dayanır. Portland çimentosu betonu sıfır-gerilme sıcaklığı ile gerçek portland çimentosu betonu plaka sıcaklığı arasındaki fark, çatlak açıklığına yönelik etkileyici bir girdidir. Bu parametre ile ilgili yapılacak başka doğrulama işlemleri, oldukça yardımcı olucaktır. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için kalıcı kıvrılma/çarpılma uygulamaları, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılara da uygulanır. Bu faktörlerin azaltılması sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar için yararlıdır.

Daha önceki sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı projelerinden veri temin etmek ve tahminlerin gerçeğe ne kadar yakın olduklarını anlamak için çatlak aralığı, çatlak genişliği, ve çatlak yük transfer etkinliğini tahmin etmek için yazılımı çalıştırmak diğer bir yaklaşımdır. Bu durum, sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı farklı girdilerinin gözden geçirilmesini ve çatlak genişliği kalibrasyon sabitinin değiştirilmesine (önceden blirlenmiş değeri 1.0'dır ve ayarlamanın ihtiyaç duyulduğu yön doğrultusunda daha düşük veya daha yüksek değerler alabilir) neden olur.

Düzgünlük (Derzli Donatısız ve Sürekli Donatılı Tipteki Rijit Üstyapılar)

Sürüş kalitesi/düzgünlük, hem tasarım hem de üstyapı yönetimi amaçları nedeniyle, Eyalet karayolları tarafından kullanılan en yaygın performans göstergelerinden

biridir. Tasarım Rehberine dahil edilen önemli bir kavram, bozulma ve düzgünlük arasındaki ilişkinin tanımlanmasıdır. Diğer bir değişle, bazı bozulmalar, zamanla, IRI üzerinde önemli bir etki yaratabilmektedir. Dolayısıyla, düzgünlük; uygulamalarda önemli bir unsur veya deneydeki parametre olarak dikkate alınmalıdır. Başlangıçtaki düzgünlük; Tasarım Rehberi için direkt bir girdidir ve gelecekteki düzgünlük üzerinde temel bir etkiye sahiptir. Bu girdi, projenin hangi düzgünlük şartnamelerine bağlı olarak inşa edildiğine dayalı olarak oldukça büyük değişim gösterir. Son yıllarda inşa edilen projelerden elde edilen veriler, girdinin ortaya konulmasında büyük önem taşımaktadır.

Rijit üstyapılar için, rehber iki model içermektedir . Modeller, yeni üstyapı inşaatları ve rehabilitasyon tasarımlarında kullanıma uygundur. Bu modeller için hazırlanan girdiler; çatlama, kırılma, ilk düzgünlük ve derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar için saha koşullarını kapsamaktadır. Rehabilitasyon tasarımı için modeller, yamama gibi değişkenlerle ilgili bakımı da kapsamaktadır.

Tasarım Güvenilirliği

Tasarım güvenilirliği ve bunun her bir bozulma modeli için standart sapma ile ilişkilendirilmesi, ulusal veritabanından alınan sonuçlara dayalıdır. Özellikle, “tahmin edilen” bozulma ve “gözlemlenen” veya “ölçümlenen” bozulma arasındaki farkın standart sapması, ulusal kalibrasyon veritabanından alınarak tahmin edilen bir bozulma fonksiyonu olarak hesaplanır. Bu hata, oldukça büyük olabilir ve yerel kurum için alında en masraflı üstyapı tasarımı olarak sonuçlanır.

Eğer karayolları kurumu, yerel üstyapı standartlarını kullanan modellerin kalibrasyonuna ve girdilere yönelik iyileştirmeleri yaparsa, bu çaba, bu tahmin hatasını azaltabilir. Tasarım güvenilirliğinde kullanılan standart sapma için, yeni bir ilişki, kurumdan alınan yerel kalibrasyon verileri kullanılarak geliştirilebilir. Bu gelişmenin etkisi, tasarımda daha az belirsizlik ve hata olacağından, daha düşük maliyetli bir üstyapı tasarımı ile sonuçlanabilmektedir.

Kurum, önceki Rehberdeki aynı tasarım güvenilirlik düzeyini kullanmamalıdır. Bu, yerel koşullara dayalı olarak kurum tarafından ortaya konmalıdır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelişmiş Avrupa ülkelerinde enerji ve petrol krizinin yaşandığı asrımız koşullarında rijit üstyapılara “Geleceğin Ekonomik Çözümü” gözü ile bakılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri’nde; otoyolların %80’i, AB ülkelerinde ise önemli bir bölümü rijit üst yapıdır ve söz konusu ülkelerde bu konuda ciddi araştırmalar ve uygulamalar yapılmaktadır.

Sürekli gelişmekte olan rijit üstyapı teknolojisinin karayollarımıza girebilmesi için, ülkemizde de bu konuda deneyimli elemanların yetiştirilmesi, bilgi birikiminin sağlanması ve konuya olumlu bir şekilde eğilinmesi gerekmektedir.

Trafikte düşük yıllık artış oranı bulunan kesimlerde ve takviye çalışmalarında esnek üstyapıların tercih edilmesinin uygun olacağı açıktır.

Taşıma gücü zayıf olan taban zeminli yerlerde, trafik hacminin yüksek olduğu veya olacağının tahmin edildiği yollarda, trafik artış oranının yüksek olduğu yollarda ve ağır taşıt miktarının fazla olduğu yerlerde ise rijit üstyapı seçeneğine yönelinmesi daha ekonomik ve güvenli olmaktadır.

Bir üstyapı seçimi yapılırken, teknik ve ekonomik parametrelerin birlikte dikkate alınması gerekir. Bunların tek olarak değerlendirilmesi, en uygun çözüm için yetersiz olup sağlıklı sonuç vermemektedir. Ülkemizde sadece esnek üstyapıların uygulanması ve rijit üstyapılara yer verilmemesi son derece hatalıdır. Türkiye’de rijit üstyapı teknolojisindeki gelişmelerden yararlanılmalı, üstyapının temel ve kaplama tabakasının değiştirilmesinin gerektiği çalışmalarda, yeni yol ve otoyol inşaatında rijit üstyapı seçeneği mutlak surette dikkate alınmalıdır.

Ayrıca iklim koşulları nedeniyle bitümlü kaplama uygulanmasında başarısızlığın görüldüğü bölgelerde, rijit üstyapı ile sorunun çözülmesi büyük olasıdır. Bunun için de her yeni tekniğin sunulma ve benimsenmesinde de görülmekte olduğu gibi, her düzeyde personelin en iyi ve yoğun şekilde eğitimi ve ilgili bütün bölümler (yönetim, müteahhit, laboratuvarlar ve endüstri) arasındaki iletişim ve bilgi akışını sağlayan bir politikanın varlığı şarttır.

Malzemelerin esas karakteristiklerinden dolayı rijit üstyapılar genellikle, sadece yüksek yoğunluktaki trafiğe uygunmuş gibi düşünülmektedir fakat, bu tür üstyapılar aynı zamanda düşük hacimli yollara özgü olan mekanik dayanım ve durabilite gerekliklerinin karşılanması için gerekli olan esnekliği de gösterebilmektedirler.

Rijit üstyapılar, bakım işlerinin azaltılmasının önemli olduğu durumlarda iyi bir alternatiftir. Rijit üstyapılar olağanüstü dayanıma ve durabiliteye sahiptir. Rijit üstyapının aşınma direnci, hemen hemen hiç bakıma ihtiyaç duyulmadan ağır taşıtların geçişi altında bile uzun yıllar boyunca kullanımını sağlar. Bu durum düşük hacimli yollar için çok avantajlı olabilmektedir.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar, ilk yapım maliyetinin daha düşük oluşu ve yapım ile onarımın nispeten kolay olması sebebiyle dünya çevresinde genellikle kullanılan üstyapı tipidir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, yüksek hacimli trafiğin taşındığı yollarda büyük başarı elde edilmesi için bazı aracı kurumlar tarafından en sık kullanılan üstyapı tipidir.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıları düzenli olarak inşa eden kurumlar, bu tipteki rijit üstyapıları maliyet bakımından derzli-donatısız tipteki rijit üstyapılarla rekabet edebilir bulmaktadırlar. Fakat sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıları inşa etmemiş olan kurumlar, bu tip üstyapıların ilk maliyetini gerekli olan deneyim sürecinden dolayı derzli donatılı tipteki rijit üstyapılara oranla daha yüksek bulmaktadırlar.

Derzli donatılı tipteki geleneksel rijit üstyapılar derzlerde oluşan kırılmalar (ihtiyaç duyulan geniş hareket nedeni ile) ve rötre çatlak kırılmaları (yetersiz miktardaki donatı nedeni ile) nedeni ile birçok projede nispeten zayıf performans göstermişlerdir. Bu durum daha güvenilir performansın elde edilebilmesi için özellikle daha kısa derz aralıkları ve daha yüksek miktarda donatı içeren tasarımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Doğru tasarım ve durabil malzemelerle inşa edilen hem derzli donatısız hem de sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar uzun ömürlü, düzgün sürüş yüzeyine sahip yolların oluşturulması için gerekli potansiyele sahiptirler. Bununla birlikte belli tipteki rijit üstyapılar belli durumlarda diğerlerine göre daha uygundur.

Derzli donatısız tipteki rijit üstyapı tasarımı hemen hemen bütün bölgelerde uygulanabilir olduğuna inanılan güvenilir tasarımlar ortaya koymuştur. Bu tip yollar kompleks değildir ve portland çimentosu betonu ile inşa edilen rijit üstyapı

tiplerinden ilk yapım maliyeti en düşük olanıdır. Bunun yanında son 20 yıldır en geniş kullanıma sahip olan rijit üstyapı tipidir. Başarılarında gerekli olan en kritik tasarım elemanı, etkili derz aralıkları ve yeterli yük transferlerinin sağlanmasıdır. Bununla birlikte derz sayısının artışı ile tasarımda daha büyük derz bakım ihtiyaçları doğar. Bunun dışında derzli donatısız tipteki rijit üstyapıların tasarımı, gelecekteki rehabilitasyonu, enine derzlerin ve bunların rehabilitasyon performansı üzerindeki potansiyel etkilerinin dikkatle göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuştur.

Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı tasarımı yüksek sınıftaki, yüksek hacimli trafiğin taşındığı karayollarında rağbet gören üstyapı tipidir. Genellikle yüksek yapım maliyetlerine sahiptirler ve geometrik açıdan kompleks olan projelerde kullanımları sıkıntı yaratabilmektedir. Fakat, uzun yıllar boyunca bakım maliyetleri düşüktür ve uzun yıllar boyunca düzgünlüklerini koruyabilmektedirler. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar, uzun hizmet ömürlerinin ve sıkça görülen kapanmaların veya diğer trafik problemlerinin (kesilmelerinin) önüne geçmek isteyen karayolu kurumlarını etkileyen düşük bakım ihtiyaçları nedeni ile kentsel alanlarda belki de en uygulanabilir olan rijit üstyapı tipidir. Bununla birlikte bu tip rijit üstyapılar uzun ömürlü ve düşük bakım maliyetinin istendiği kırsal karayollarında da uygundurlar. Bazı karayolu kurumunun sürekli donatılı tipteki rijit üstyapı inşası ile ilgili iyi bir deneyime sahip olmamalarına rağmen (zayıf tasarım ve inşa sebebiyle), sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar bir çok ülkedeki yüksek hacimli trafiğin taşındığı yollarda karayolu kurumları tarafınca geniş bir kullanıma sahiptir. Çatlakların genişlemeye başlaması ve yapısal boşlukların (punchout) ortaya çıkması ile birlikte sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların mümkün olduğu kadar çabuk bir şekilde rehabilite edilmesi gerekmektedir. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapıların tümüyle donatıya sahip olması iyi performans göstermesini sağlarken büyük maliyetlerin de ortaya çıkmasına neden olur. Asfalt betonu ile oluşturulan takviye tabakaları herhangi bir yansıma çatlağının oluşmaması nedeni ile sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılarla çok iyi çalışır ve bu göz önünde bulundurulması gereken önemli bir avantajdır. Bazı kurumlar yapıda daha düşük gürültünün sağlanması ve bunun yansıma çatlaklarına neden olmadığı durumlarda özel asfaltik ince bir yüzeyle beraber kompozit üstyapılar meydana getirmişlerdir.

Özetle, portland çimentosu betonu kullanılarak inşa edilen üstyapıların seçiminde farklı tasarım gereklilikleri göz önünde bulundurularak tüm bu özel faktörlerin ve her bir üstyapı tipinin performans yeteneklerinin dikkate alınması gerekir. Bölge ve tasarım bağlamında her inşaat durumu farklıdır ve daha önce anlatılan faktörlerin bazı durumlarda diğerlerinden daha büyük önemi olacaktır. Yapı – ömür maliyet analizi üstyapı tipinin seçimine yardımcı olmak amacıyla göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte, verilen koşullar altında en uygun üstyapı tipinin tanımlanabilmesi için bölgesel deneyimlerin ve mühendislik kanılarının da eklenmesi gerekir.

AASHTO 1972, 1986 ve 1993 tasarım yöntemleri, 1960'lı yıllarda ABD'de yapılan bire bir ölçekli yol testi sonuçlarına dayanmaktadır. Tasarım, tamamen deney sonuçlarına, diğer bir deyişle, deney yolunda kullanılan malzemelerin özelliklerine, yol üzerinden geçen taşıtların dingil konfigürasyonuna ve bölgenin iklim koşullarına bağlı olarak geliştirildiğinden, ampirik bir yöntemdir. Dolayısıyla, diğer bölgelerde, deney yolundan farklı malzemelerin kullanılması veya farklı dingil yüklemelerinin söz konusu olması durumlarında dikkatli olmak gerekmektedir.

Ancak, zamanla ağır taşıt trafiğinin artması, yeni malzemelerin yol inşaatında kullanılmaya başlaması ile birlikte, 1980'li yıllardan sonra, gelişmiş ülkeler (özellikle Avrupa ülkeleri) tarafından, analitik-ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Analitik-ampirik üstyapı tasarımı, diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi, uygulanan yükü ve malzemelerin mekanik özelliklerini (elastisite modülü, Poisson oranı, esneklik modülü vb.) dikkate alarak üstyapıda oluşacak, gerilme veya birim şekil değiştirmelerin hesaplanması esasına dayanmaktadır. Günümüzde, gelişmiş ülkelerin büyük bir çoğunluğu, kendi ülke koşullarına uygun analitik tasarım yöntemi geliştirmiş ve kullanmaktadır. Analitik-ampirik tasarım yöntemleri genel olarak üstyapı altında oluşan gerilmelerin veya birim şekil değiştirme miktarının sınırlandırılması ve taban zemini üzerinde oluşan basınç gerilmesinin veya düşey birim şekil değiştirmesinin sınırlandırılması esasına dayanmaktadır.

Üstyapıların tasarımı için kullanılan çeşitli AASHTO yayınları yıllardır çok iyi hizmet etmiştir. Bununla beraber birçok ciddi sınırlamalar da mevcuttur. Trafik yüklemelerindeki eksiklik, rehabilitasyon eksiklikleri, iklimsel etki eksiklikleri, taban zemini eksiklikleri, kaplama malzemesi eksiklikleri, temel tabakası eksiklikleri, kamyon sınıflandırma eksiklikleri, yapım ve drenaj eksiklikleri, tasarım ömrü

eksiklikleri ve performans eksiklikleri bunların başlıcalarıdır. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla 2004 yılında NCHRP 1-37A Projesi adı altında son tasarım kılavuzu yayınlanmıştır.

Ülkemizde de; doğal olarak, analitik ampirik tasarım yöntemlerinin bir an önce üstyapı çalışmalarına dahil edilmesi ve bu yöntemlerin kullanılması için gerekli olan ayrıntılı trafik ve iklim verilerinin toplanması hazırlıkları yapılmalıdır.

Tüm bu veri ve bilgiler, Türkiye'nin, neredeyse ülkenin tüm ulaşım ve taşımacılık hareketini üstlenen karayollarının yapımında 50 yılı aşkın bir süredir benimsediği “tamamen asfalt betonu” yaklaşımını artık değiştirmek durumunda olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Diğer ülkelerin 100 yılı geçen deneyimleri, Türkiye'nin ekonomik ve toplumsal (kentsel) gerçekleri ve çağdaş mühendislik biliminin verileri ışığında, farklı çözüm seçeneklerinin de denenmesinin zamanı gelmiş, hatta bu konuda geç bile kalınmıştır.

Bu çalışmada savunulan, kuşkusuz bütün karayollarımızın betona dönüştürülmesi değil, ortam ve koşullara göre en uygun seçeneğin tercih edilerek, ülkemiz için en kazançlı ve verimli olan ne ise onun yapılması, özellikle yolun orta ve uzun vadedeki bakım-onarım-işletim giderlerinin hesaba katılmasıdır. Karayolları Genel Müdürlüğü ve belediyelerimizin, zaten kısıtlı olan kaynaklarını ancak bakım-onarım çalışmalarında kullanabildikleri hatırlanacak olursa, bu noktanın önemi daha iyi anlaşılacaktır.

Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü ve belediyelerimizin, yani ülkemizde yol yapımı konusunda karar verici durumdaki kurumlarımızın, Türkiye'nin de artık diğer ülkeler gibi, beton yol seçeneğini dikkate almak durumunda olduğunu görerek, buna uygun planlamalar yapması gerekmektedir.

Türkiye gerek kaynak, gerekse mühendislik (uygulama) açısından beton yol yapımında son derece avantajlı ve yeterlidir. Ülkemizde önemli uluslararası projelerde imzası olan ve beton yol uygulamasını rahatlıkla yapabilecek, havaalanı pistleri gibi benzer çalışmaları bulunan büyük firmalar mevcuttur. Önemli olan karar vericilerin harekete geçmesi, beton yolların ülkemiz için artık bir gereklilik olduğu gerçeğinin görülmesidir.

Rijit üstyapı teknolojisinin seçimi, bir kalite politikasının seçimi demektir.

KAYNAKLAR

- [1] Ağar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G., 1998. Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları), İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [2] Ağar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G., 2001. Beton Asfalt Kaplama İle Beton Yol Karşılaştırması, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, Beton Yollar Özel Sayısı, 48-51.
- [3] Ağar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G., 2001. Türkiye Karayollarındaki Üstyapı, Yapım ve Bakım Politikasının Değerlendirilmesi, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, Beton Yollar Özel Sayısı, 44-45.
- [4] AASHTO, ACPA, FHWA, PCA, SHRP, TRB, 1992. *Report On the 1992 US Tour Of European Concrete Highways*.
- [5] Briessinck, M., Heleven, L. and Hendrix, L., 1998. “New Standart Design for Cocrete Roads in Flanders (Belgium)”, *8th International Symposium on Concrete Roads*, Lisbon, September.
- [6] Carpenter, S. H. , Croveti, M. R., Smith, K. L., Rmelli, E. H., and Wilson, T. P., 1992. Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, *Pavement Design and Construction Considerations*, Volume I: FHWA-SA-93-004, Federal Highway Administration, Washington, DC, December.
- [7] CEMBUREAU, 1987. “Concrete For Rural Roads”.
- [8] **Concrete Pavement Design Details and Construction Practises**, 2001. NHI Course No. 131060, FHWA.
- [9] Darter, M. I., 1993. *Report on The 1992 U.S. Tour of European Concrete Highways*, Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-012, Washington, DC, January.
- [10] **ERES Concultants, Inc.**, 1999. Pavement Subsurface Drainage Design-Reference Manual, Washington, DC; Federal Highway Administration.
- [11] **Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü**, 2001. Beton Yollar Bilgi Notu.

- [12] **Khazanovich, L.**, 2003. Your “First” Concrete Pavement- Concrete Pavements For High Volume Roads, *9th International Symposium on Concrete Roads*, Istanbul- Turkey, 27th April 2003.
- [13] **Khazanovich, L. and Darter, M.**, 2004. *Guidance Especially For First Time Concrete Pavement Report-* Prapered For Turkish Cement Manufacturers’ Association Ankara, Turkey.
- [14] **Larson, R. M., Vanikar, S. and Forster, A.** 1993. *Summary Report-U.S. Tour European Concrete Highways (U.S. TECH)- Follow-up Tour Of Germany and Austria*, Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-080, Washington, DC, October.
- [15] **NCHRP**, 2002. 2002 Design Guide- A product of NCHRP 1-37-A.
- [16] **Ünver, H. ve Bazyar, T.**, 1988. Beton Yollar- Dizayn- PÇ Betonu Yapımı.
- [17] **Uçar, S. ve Konrapa, U.**, 2002. Yol Üstyapıları Maliyetleri Araştırması.
- [18] **The British In-situ Concrete Paving Association**, 2002. Cement&Concrete Association in Pavement Construction, BCA Crowthorne, Berkshire.
- [19] **T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü**, 2003. Karayolları Teknik Sözlüğü, Şubat.
- [20] **Van Wijk, A., J. and Lovell, C. W.**, 1986. “ Pediction of Subbase Erosion Caused by Pavement Pumping” Transportation Research Record 1099, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [21] **Yeğniboğalı, A ve Başkoca, A.**, 2005. Afyonkarahisar’daki Yolun Hikayesi, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, Mayıs.
- [22] **Yu, H.T., Smith, K. D., and Darter, M.I.**, 1995. Field and Analytical Evaluation Of The Effects of Tied PCC Shoulder and Widened Slabs on Performance of JPCP, *Final Report*, Colorado Department of Transportation, Denver, CO, October.

ONUR ECEVİT

1980 yılında Mardin’de doğdu. İlköğrenimini 1991 yılında, orta öğrenimini 1994 yılında İzmir’de tamamladı. 1998 yılında İzmir Teğmen Ali Rıza Akıncı Süper Lisesi’nden mezun oldu. 2003 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliğini üçüncülük derecesi ile bitirdi. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği programını kazandı.

Özel sektördeki bir inşaat firmasında İnşaat Mühendisi olarak görev yapmakta olup iyi derecede İngilizce ve Romence bilmektedir.