

**ASFALT FİLM KALINLIĞININ BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN YAŞLANMASINA VE SUYA
DUYARLILIĞINA ETKİSİ**

143108

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Burak ŞENGÖZ
501982010

143108

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ocak 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Ekim 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emine AĞAR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Güven ÖZTAŞ

Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ (A.Ü)

Prof. Dr. Nadir YAYLA

Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
REKÜZANTASYON MERKEZİ

EKİM 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışma Asfalt Mütcaahhitleri Derneği (ASMUD) tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Emine AĞAR'a, büyük yardımlarını gördüğüm Sayın Prof. Dr. Mehmet ULUÇAYLI'ya, birçok konuda katkı sağlayan University of Maryland'den Assoc. Prof. Dimitrios GOULIAS'a, aynı üniversitede laboratuvar çalışmalarına önemli bir katkısı bulunan Nelson GIBSON ve Han KIM'e, çalışmanın çeşitli aşamalarında yardımlarını gördüğüm sayın Öğr. Gör. Dr. Serhan TANYEL'e, İnş. Yük. Müh. Ali TOPAL'a ve diğer mesai arkadaşlarıma, ve bütün doktora öğrenimim süresince bana destek veren aileme teşekkür ederim.

Ekim, 2003

Burak ŞENGÖZ



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ KAPLAMALARDAKİ BOZULMALAR	3
2.1. Kalıcı Deformasyon	5
2.2. Çatlaklar	8
2.2.1. Yorulma çatlakları	9
2.2.2. Düşük sıcaklık çatlakları	11
2.3. Suyla Bağlı Bozulmalar	13
3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICI DAVRANIŞI	14
3.1. Bitümlü Bağlayıcının Sıcaklığa Bağlı Davranışı	15
3.1.1. Yüksek sıcaklıklardaki davranış	16
3.1.2. Orta sıcaklıklardaki davranış	18
3.1.3. Düşük sıcaklıklardaki davranış	19
3.2. Bitümlü Bağlayıcının Film Kalınlığına Bağlı Davranışı	19
4. YAŞLANMA	24
4.1. Yaşlanmayı Etkileyen Faktörler	24
4.1.1. Oksidasyon	25
4.1.2. Buharlaşma veya uçucu madde kaybı	28
4.1.3. Sızıntı sertleşmesi	28
4.1.4. Tikotropi	28
4.1.5. Sinerisis	28
4.1.6. Polimerizasyon	29
4.2. Yaşlanmanın Kimyasal Analizi	29
4.3. Kaplama Yapımının Değişik Aşamalarında Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması	31
4.3.1. Depolanma sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması	31
4.3.2. Agrega ile karıştırma sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması	31

4.3.3. Sıcak karışımın depolanması, taşınması ve serilmesi	
sırasındaki bitümlü bağlayıcı yaşlanması	33
4.3.4. Servis ömrü boyunca bitümlü bağlayıcı yaşlanması	33
4.4. Bitümlü Bağlayıcıyı ve Bitümlü Sıcak Karışımları Yaşlandırma Yöntemleri	34
4.4.1. Bitümlü bağlayıcıyı yaşlandırma yöntemleri	35
4.4.1.1. Genişletilmiş sıcaklık yöntemleri	35
4.4.1.2. Oksidasyon yöntemleri	37
4.4.1.3. Morötesi ve kızılötesi ışıık yöntemleri	38
4.4.2. Bitümlü sıcak karışımları yaşlandırma yöntemleri	38
4.4.2.1. Genişletilmiş sıcaklık yöntemleri	39
4.4.2.2. Oksidasyon yöntemleri	41
4.4.2.3. Morötesi ve kızılötesi ışıık yöntemleri	41
4.5. Çalışmada Kullanılan Yaşlandırma ve Değerlendirme Yöntemleri	44
4.5.1. Kısa ve uzun dönem yaşlanma	44
4.5.2. Değerlendirme yöntemleri	44
4.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Yaşlanmasında Etkili Karışım Parametreleri	45
5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN SUYA KARŞI DUYARLILIĞI	51
5.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Suya Karşı Duyarlılıklarını Etkileyen Faktörler	52
5.1.1. Agrega etkisi	52
5.1.2. Bitümlü bağlayıcı etkisi	58
5.1.3. Karışım bileşimi ve yapım etkisi	59
5.1.4. Çevresel faktörlerin etkisi	61
5.1.5. Trafiğin etkisi	61
5.2. Suya Karşı Duyarlılığa İlişkin Deney Yöntemleri	62
6. LABORATUARDA YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ALETLER, DENEY YÖNTEMLERİ ve MALZEMELER	70
6.1. Kullanılan Aletler	70
6.1.1. Dönel viskometre	70
6.1.2. Döner ince film etüvü (rolling thin film oven -RTFO)	71
6.1.3. Basınçlı oksidasyon kabı (pressure aging vessel-PAV)	73
6.1.4. Dinamik kesme aleti (dynamic shear rheometer-DSR)	74
6.1.5. Asfalt kiriş eğilme aleti (bending beam rheometer-BSR)	74
6.1.6. Superpave yoğurmalı presi (gyratory compactor)	75
6.1.6.1. Yoğurmalı presin tarihçesi	76
6.1.6.2. Piyasada mevcut yoğurmalı presler	78
6.1.6.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan superpave yoğurmalı presi	78

6.1.6.4. Superpave yoğurmalı presine ait bilgisayar programı	83
6.1.7. MTS (material testing system) aleti	85
6.2. Kullanılan Malzemeler ve Uygulanan Deneyler	95
6.2.1. Agregası ve uygulanan deneyler	95
6.2.2. Bitümlü bağlayıcı ve uygulanan deneyler	100
6.2.2.1. Dönel viskozite deneyi	100
6.2.2.2. Döner ince film etüv deneyi	101
6.2.2.3. Basınçlı oksidasyon kabı deneyi	102
6.2.2.4. Dinamik kesme deneyi	103
6.2.2.5. Asfalt kırış eğilme deneyi	103
6.3. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı ve Hazırlanması	105
6.3.1. Agregası yüzey alanı hesabı ve bitümlü bağlayıcı oranlarının belirlenmesi	105
6.3.2. Absorbe asfalt dikkate alınarak hesaplanan asfalt filmi kalınlıkları	108
6.3.3. Superpave yoğurmalı pres aleti kullanılarak bitümlü karışımların hazırlanması	110
6.3.4. Bitümlü sıcak karışımların değişik hava boşluk oranları ile sıkıştırılması	113
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	114
7.1. Yaşlanma Etkisinin İncelenmesi	114
7.1.1. Bitümlü karışımların esneklik modülü için indirekt çekme deneyi	114
7.1.2. Esneklik modülü ve indirekt çekme deneyi sonuçlarına ilişkin modeller	121
7.2. Neme Karşı Duyarlılığın İncelenmesi	130
7.2.1. Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin saptanması	132
7.2.2. İndirekt çekme gerilmesi deneyi sonucuna ilişkin modeller	134
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	136
KAYNAKLAR	140
EKLER	149
ÖZGEÇMİŞ	196

KISALTMALAR

TFOT	: İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society for Testing Materials
RMFO	: Döner Mikrofilm Etüv Deneyi
RTFOT	: Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
TODT	: Eğik Etüv Sağlamlık Deneyi
TFAAT	: Hızlandırılmış İnce Film Halinde Yaşlanma Deneyi
TRLL	: İngiltere Yol Araştırma Laboratuvarı
SHRP	: Strategic Highway Research Program
LVDT	: Lineer Değişken Diferansiyel Transdüser
SUPERPAVE	: SUperior PERforming Asphalts PAVEments
PAV	: Basınçlı Oksidasyon Kabı
GTM	: Gyrotory Testing Machine
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
AC	: Alternatif Akımlı Transdüser
DC	: Direk Akımlı Transdüser
MTS	: Material Testing System
VMA	: Mineral Agrega İçindeki Boşluk
VFA	: Asfalt ile Dolu Boşluk

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. : Bitümlü tabakalarda kalıcı deformasyonu etkileyen faktörler....	7
Tablo 2.2. : Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler.....	12
Tablo 4.1. : Bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını etkileyen faktörler.....	26
Tablo 4.2. : Yaşlanmamış bağlayıcılara ilişkin bileşenler.....	29
Tablo 4.3. : Asfalt kaplamadan geri kazanılmış bağlayıcı bileşenleri.....	30
Tablo 4.4. : Boscan AC-10 bağlayıcının değişik yöntemler kullanılarak yaşlandırma düzeyleri.....	37
Tablo 4.5. : Laboratuarda yaşlandırma ve değerlendirme yöntemleri.....	42
Tablo 4.6. : Karışım üzerine uygulanan deneylerin değerlendirilmesi.....	46
Tablo 5.1. : Suyu karşı duyarlılığı etkileyen faktörler.....	53
Tablo 5.2. : Malzeme Cinslerine İlişkin Yüzey Gerilme Değerleri.....	54
Tablo 5.3. : Bazı agregaların silika içerikleri.....	57
Tablo 6.1. : Piyasada mevcut yoğurmalı presler.....	78
Tablo 6.2. : Kontrol ünitesine ait tuşlar ve işlevleri.....	82
Tablo 6.3. : Nominal maksimum dane boyutuna ilişkin kontrol bölgesi limit değerleri.....	97
Tablo 6.4. : Nominal maksimum dane boyutuna ilişkin yasak bölge limit değerleri.....	97
Tablo 6.5. : Agrega grupları üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları.....	98
Tablo 6.6. : Elek analizi deneyi sonuçları.....	99
Tablo 6.7. : Sıcak karışımda kullanılacak gradasyon değerleri.....	99
Tablo 6.8. : Bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları.....	104
Tablo 6.9. : Yüzey alanı hesabı.....	106
Tablo 6.10. : Bağlayıcı yüzdeleri hesabı.....	107
Tablo 6.11. : Asfalt film kalınlıklarına bağlı maksimum teorik özgül ağırlık değerleri.....	108
Tablo 6.12. : Absorbe asfalt dikkate alınarak hesaplanan asfalt film kalınlıkları.....	109
Tablo 6.13. : Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	111
Tablo 7.1. : Deneysel tasarım değişkenleri.....	120
Tablo 7.2. : Asfalt film kalınlığına bağlı esneklik modülü oranları.....	123
Tablo 7.3. : Asfalt film kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri.....	125
Tablo 7.4. : Asfalt film kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri.....	129
Tablo 7.5. : Deneysel tasarım değişkenleri.....	134
Tablo 7.6. : Kuru ve koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmeleri oranları.....	135
Tablo A.1. : Sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların hava boşluk yüzdeleri.....	150

Tablo B.1.	: Yaşlandırılmamış, düşük boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	157
Tablo B.2.	: Yaşlandırılmamış yüksek boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	158
Tablo B.3.	: Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	159
Tablo B.4.	: Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	160
Tablo B.5.	: Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	161
Tablo B.6.	: Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri.....	162
Tablo C.1.	: Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme deneyi sonuçları.....	163
Tablo H.1.	: Kuru numuneler üzerine uygulanan indirekt çekme gerilmesi deneyi sonuçları.....	193
Tablo H.2.	: Koşullandırılmış numuneler üzerine uygulanan indirekt çekme gerilmesi deneyi sonuçları.....	194

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Bozulmalara bağlı performans.....	4
Şekil 2.2 : Zayıf alt temele bağlı tekerlek izi oluşumu.....	6
Şekil 2.3 : Zayıf karışıma bağlı tekerlek izi oluşumu.....	6
Şekil 2.4 : Tekerlek izi derinliğine bağlı bozulma durumu.....	8
Şekil 2.5 : Bitümlü kaplamalarda kritik birim şekil değiştirmeler ve yorulma çatlakları.....	9
Şekil 2.6 : Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplama çekme mukavemeti.....	11
Şekil 3.1 : Bitümlü bağlayıcının yapım ve servis ömrü boyunca gösterdiği özellikler.....	15
Şekil 3.2 : Sıvı akış özelliklerinin mikroskopik görüntüsü.....	16
Şekil 3.3 : Değişik sıvıların viskozite özellikleri.....	17
Şekil 3.4 : Viskoelastik davranış modeli.....	18
Şekil 3.5 : Değişik kopma şekillerine göre asfalt filmlerinin gerilme deformasyon eğrileri.....	21
Şekil 3.6 : Film kalınlığına bağlı bağlayıcı davranış eğrisi.....	22
Şekil 4.1 : Film kalınlığının yaşlanma indeksi üzerindeki etkisi.....	31
Şekil 4.2 : Agrega ile karıştırmadan itibaren göreceli viskozite artışı.....	34
Şekil 4.3 : Hava boşluk oranının yaşlanma üzerinde etkisi.....	46
Şekil 4.4 : Hava boşluğu yüzdesinin bitümlü bağlayıcının penetrasyon değerine etkisi.....	47
Şekil 4.5 : Hava boşluğu yüzdesinin bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasına etkisi.....	47
Şekil 4.6 : Bağlayıcı film kalınlığı ile oksijen absorpsiyonu arasındaki ilişki.....	48
Şekil 5.1 : Agrega ile bitüm su fazında değme açısı.....	55
Şekil 5.2 : Karışımların hava boşluk içeriklerine bağlı dayanımları.....	60
Şekil 5.3 : Kaynayan su deneyi.....	63
Şekil 5.4 : Serbest basınç aleti.....	64
Şekil 5.5 : Sabit tabanlı teksas donma çözülme aleti.....	65
Şekil 5.6 : Hamburg tekerlek izi deneyi.....	66
Şekil 5.7 : Hamburg tekerlek izi test sonuçları.....	67
Şekil 5.8 : Çevresel iklimlendirme sistemi.....	68
Şekil 6.1 : Dönel viskometre.....	71
Şekil 6.2 : Döner ince film etüv aleti-genel görünüş.....	72
Şekil 6.3 : Döner ince film etüv aleti-iklimlendirme haznesi.....	72
Şekil 6.4 : Basınçlı yaşlandırma kabı-genel görünüşü.....	73
Şekil 6.5 : Basınçlı oksidasyon aleti genel parçaları.....	74
Şekil 6.6 : Dinamik kayma reometresi.....	75
Şekil 6.7 : Asfalt kırış eğilme deneyi.....	76

Şekil 6.8	: Troxler yoğurmalı presi model no 4140.....	79
Şekil 6.9	: Troxler yoğurmalı presine ait parçalar.....	80
Şekil 6.10	: Troxler yoğurmalı presi kontrol ünitesi.....	81
Şekil 6.11	: Troxler yoğurmalı presinde kullanılan kalıplar.....	83
Şekil 6.12	: Troxler yoğurmalı presine ait gyrotalk programı.....	83
Şekil 6.13	: Gyropave 2000 superpave sıcak karışım tasarımı çalışma sayfası.....	84
Şekil 6.14	: Gyropave 2000 superpave sıcak karışım tasarımı sonuç sayfası.....	85
Şekil 6.15	: Gyropave 2000 superpave sıcak karışım tasarımı sonuç grafikleri.....	86
Şekil 6.16	: Sıcaklık kontrol kabini.....	87
Şekil 6.17	: Yükleme çerçevesi.....	88
Şekil 6.18	: Yatay ve düşey LVDT.....	89
Şekil 6.19	: MTS kontrol paneli.....	89
Şekil 6.20	: Mikro-konsol.....	90
Şekil 6.21	: Mikro-profil.....	91
Şekil 6.22	: Yük ve LVDT kartuşları.....	92
Şekil 6.23	: Data iletim sistemi (MIO-16 Board).....	92
Şekil 6.24	: Labview anasayfası.....	93
Şekil 6.25	: Labview çalışma program düzeni.....	94
Şekil 6.26	: 19 mm maksimum dane boyutu için maksimum yoğunluk hattı.....	96
Şekil 6.27	: Superpave gradasyon limitleri	96
Şekil 6.28	: 12.5 mm dane boyutu için yasak bölge, kontrol noktaları ve kontrol eğrisi.....	100
Şekil 6.29	: PG 64-22 bağlayıcıya ait sıcaklık-viskozite ilişkisi.....	110
Şekil 6.30	: Superpave yoğurmalı pres cihazından elde edilen numune (A) ve karot ve kesme işlemlerinden sonra elde edilen numuneler (A,B).....	112
Şekil 7.1	: Karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılma etkilerinin İncelenmesine ilişkin akış şeması.....	115
Şekil 7.2	: İndirekt çekme gerilmesi deneyine ilişkin yükleme şekli.....	116
Şekil 7.3	: İndirekt çekme gerilmesi deneyine ilişkin Yük deformasyon özellikleri.....	117
Şekil 7.4	: Esneklik modülü yük grafiği.....	118
Şekil 7.5	: Zamana bağlı yatay ve düşey deformasyon eğrileri.....	119
Şekil 7.6	: Karışımların suya karşı duyarlılıklarının incelenmesine ilişkin akış şeması.....	131
Şekil D.1	: 4.9µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi.....	171
Şekil D.2	: 5.8µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi.....	172
Şekil D.3	: 7.7µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi.....	173
Şekil D.4	: 9.6µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi.....	174

Şekil D.5	: 11.4µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü	175
Şekil E.1	: 4.9µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi.....	177
Şekil E.2	: 5.8µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi.....	178
Şekil E.3	: 7.7µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi.....	179
Şekil E.4	: 9.6µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi.....	180
Şekil E.5	: 11.4µ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi.....	181
Şekil F.1	: Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı esneklik modülü ilişkisi.....	183
Şekil F.2	: Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı esneklik modülü ilişkisi.....	184
Şekil F.3	: Düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem esneklik modülü ilişkisi.....	185
Şekil F.4	: Yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem esneklik modülü ilişkisi.....	186
Şekil G.1	: Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı indirekt çekme gerilmesi ilişkisi.....	188
Şekil G.2	: Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı indirekt çekme gerilmesi ilişkisi.....	189
Şekil G.3	: Düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem indirekt çekme gerilmesi ilişkisi.....	190
Şekil G.4	: Yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem indirekt çekme gerilmesi ilişkisi.....	191
Şekil H.1	: Kuru ve koşullandırılmış numunelerin film kalınlığı indirekt çekme gerilmeleri ilişkisi.....	195

SEMBOL LİSTESİ

T	: Tabakalar arası kayma direnci (kg/cm ²)
μ_t	: Viskozite katsayısı (poise)
dy/dt	: Kayma birim şekil değiştirme oranı
h	: Asfalt film kalınlığı (mikron)
N_f	: Yorulma çatlağı oluşturmaya başlatan yükleme sayısı
ε_t	: Çekme birim şekil değiştirmenin maksimum değeri
c, m	: Bitümlü sıcak karışımın özelliklerine ve bileşimine bağlı katsayılar
v_z	: Çekme gerilmesi (kg/cm ²)
β_z	: Çekme mukavemeti (kg/cm ²)
C_xH_y	: Bitümün kimyasal formülü
IC	: Gaestel indeksi
η_a	: Yaşlandırılmış bağlayıcının viskozite değeri (poise)
η_o	: Orijinal bağlayıcının viskozite değeri (poise)
η_a / η_o	: Yaşlanma indeksi
γ_{SB}	: Agreg-a-su yüzeysel çekimi
γ_{SW}	: Agreg-a-bitüm yüzeysel çekimi
γ_{WB}	: Bitüm-su yüzeysel çekimi
θ	: Bitüm değme açısı
G_{mm}	: Sıkıştırılmamış karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı
G_{kaba}	: Kaba agreganın özgül ağırlığı
G_{ince}	: İnce agreganın özgül ağırlığı
γ_b	: Bağlayıcı özgül ağırlığı
G*	: Bağlayıcının kompleks modülü
δ	: Faz açısı
SA	: Agreg-a yüzey alanı (m ² /kg)
Pb	: Karışımdaki asfalt yüzdesi
Ps	: Karışımdaki agreg-a yüzdesi
Gse	: Karışımdaki agreganın efektif özgül ağırlığı
Gsb	: Karışımdaki agreganın hacim özgül ağırlığı
Pbe	: Efektif asfalt içeriği (%)
Pba	: Karışımdaki absorbe asfalt içeriği (%)
S	: Uygulanan maksimum yük (kg)
D	: Numune çapı (mm)
S_T	: Çekme Mukavemeti (kg/cm ²)
h_k	: Numune kalınlığı (mm)
P_{değme}	: Değme yükü (kg)
P_{max}	: Uygulanan toplam yük (kg)
P_{devirsel}	: Devirsel yük (kg)
ΔH_1	: Ani geri gelen yatay deformasyon (mm)
ΔH_T	: Toplam geri gelen deformasyon (mm)
ΔV_1	: Ani geri gelen düşey deformasyon (mm)
ΔV_T	: Toplam geri gelen düşey deformasyon (mm)

ν_{r1}	: Ani esneklik poisson oranı
ν_{rT}	: Toplam esneklik poisson oranı
M_R	: Esneklik Modülü (MPa)
$M_{Ryaş_{düş}}$	: Yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{Ryaş_{yük}}$	: Yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{Rst_{düş}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{Rst_{yük}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
$M_{Rlt_{düş}}$	: Uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü (MPa)
ITS	: İndirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{yaş_{düş}}$	: Yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{yaş_{yük}}$	: Yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{st_{düş}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{st_{yük}}$	: Kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{lt_{düş}}$	: Uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
$ITS_{lt_{yük}}$	: Uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi (kpa)
J	: Absorbe su hacmi (cm ³)
B	: Kısmi vakum işleminden önce numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı (gr)
B'	: Kısmi vakum işleminden sonra numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı (gr)
S'	: Doymunluk derecesi (%)
I	: Hava boşluğu hacmi (cm ³)
V	: Numune hacmi (cm ³)
V_a	: Hava boşluğu yüzdesi

ASFALT FİLM KALINLIĞININ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN YAŞLANMASINA VE SUYA DUYARLILIĞINA ETKİSİ

ÖZET

Ekonomik kalkınma ile birlikte yaşam standartlarının yükselmesi, toplumların daha konforlu ve güvenli sürüş kalitesi talebini doğurmuştur. Bu durum da, yol üstyapılarının bozulmalara karşı daha dirençli ve yüksek performanslı olarak tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir. Ancak yol üstyapılarında görülen tekerlek izi oluşumu, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozulmalar, yollardan beklenen performansı ve hizmet ömrünü düşürmektedir. Bu çalışmada, yaşlanma ve suya bağlı bozulmalar üzerinde asfalt filmi kalınlığının etkisi incelenmiş ve optimum asfalt film kalınlığının saptanması amaç edinilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, bitümlü bağlayıcıların ekonomik değerine kısaca değinildikten sonra, yüksek maliyetler gerektiren üstyapılarda bozulmaları hazırlayan nedenlerin başında gelen yaşlanma olayı ve suya karşı duyarlılığın kısaca tanımları yapılmış, çalışmada izlenecek yöntem belirtilmiştir.

İkinci bölümde bitümlü kaplamalarda, artan ağır taşıt trafiği, dingil yükü, çevre ve iklim koşulları, yapım ve tasarım hataları ile malzeme hatalarına bağlı olarak meydana gelen bozulmaların sınıflandırılması yapılmıştır. Bozulmalar, kalıcı deformasyon, çatlaklar ve suya bağlı bozulmalar olarak üç bölümde incelenmiş ve bozulmaları etkileyen faktörler üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde, bitümlü bağlayıcıların yüksek, orta ve düşük sıcaklıklardaki davranışları ve film kalınlıklarına bağlı olarak bağlayıcıların gösterdikleri davranış modelleri grafikler yardımı ile açıklanmıştır.

Yaşlanma konusunun ayrıntılı olarak ele alındığı dördüncü bölümde, yaşlanmayı etkileyen faktörler ile yaşlanmanın kimyasal analizi anlatılmış ve kaplama yapımının değişik aşamalarında bitümlü bağlayıcının yaşlanma davranışı ele alınmıştır. Bölümde ayrıca, bağlayıcılar ve bitümlü sıcak karışımlar üzerine yaşlanmanın etkilerine ilişkin olarak araştırmacılar tarafından uygulanan deneyler ve kullanılan aletler üzerinde durulmuştur. Kısa ve uzun dönem olmak üzere iki bölümde incelenen bitümlü sıcak karışımların yaşlanmasında etkili olan karışım parametreleri de ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu parametrelerden asfalt film kalınlığının, bitümlü sıcak karışımların yaşlanma özellikleri üzerindeki etkilerine ilişkin günümüze kadar yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, suya bağlı bozulmalar tanımlanmıştır. Ayrıca bitümlü sıcak karışımların suya karşı duyarlılıklarını etkileyen faktörlerden olan

agrega, bağlayıcı, karışım bileşimi ve yapım etkisi, çevresel faktörler ve trafik incelenmiştir. Ayrıca karışımların suya karşı duyarlılıklarına ilişkin deney yöntemleri ana hatları ile anlatılmış ve günümüzdeki uygulama alanları belirtilmiştir.

Altıncı bölümde, laboratuarda yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan aletler ve deney yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Uygulamalarda kullanılan agrega ve bağlayıcıların özellikleri Superpave Şartnamesinde belirtilen deneyler ile saptandıktan sonra asfalt film kalınlıklarına bağlı olarak bitümlü bağlayıcı yüzdeleri hesaplanmıştır.

Yedinci bölüm deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Bu bölümde ilk olarak, Superpave Yoğurmalı Presi (Superpave Gyratory Compactor) kullanılarak hazırlanan kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluğu oranına sahip numunelere, yaşlanmanın etkilerini incelemek üzere esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmış numunelerin esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmeleri arasında film kalınlığına bağlı regresyon analizleri yapılmış ve quadratik fonksiyonlar elde edilmiştir.

Deneysel uygulamaların ikinci bölümünde, karışımların suya karşı duyarlılıkları film kalınlıklarına bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla koşullandırılmış ve kuru numuneler üzerine indirekt çekme gerilmesi deneyleri uygulanmış, sonuçlar oranlanarak model eğriler çizilmiştir.

Sekizinci ve son bölümde, yaşlanma ve suya karşı duyarlılık deneylerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmeleri model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde yaşlanmaya ilişkin optimum asfalt film kalınlığının 9-10 μ aralığında değiştiği, koşullandırılmış ve kuru numunelerin indirekt çekme gerilmeleri model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde ise suya bağlı bozulmalara ilişkin optimum asfalt film kalınlığının 9.5-10.5 μ aralığında değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara, ileride yapılacak çalışmalara esas olması düşünülen öneriler de eklenmiştir.

THE EFFECT OF ASPHALT FILM THICKNESS ON THE AGING AND MOISTURE SUSCEPTIBILITY OF HOT MIX ASPHALT

SUMMARY

The increase in the level of living conditions and social and economic development increased the demand of road users for safe and comfortable pavements with a higher driving quality. It is obvious that this demand can only be satisfied with pavement design procedures aiming pavements resistant to deformations with longer service life and satisfactory surface characteristics. Nevertheless, the commonly encountered distresses such as rutting, fatigue and low temperature cracking decrease the expected performance and service life of roads. This study was undertaken to quantify the relationship between the various asphalt film thicknesses and aging and moisture susceptibility of asphalt paving mixtures so that an optimum film thickness desirable for satisfactory mix durability could be achieved.

In Chapter I, the use of asphalt binder in pavements is evaluated from economic point of view. In addition, aging phenomenon that contributes to the other type of failures and water damage are shortly described.

In Chapter II, types of failures occurring in pavements due to increase in axle loads, heavy traffic, environmental conditions and construction and design errors are classified. Permanent deformations, cracking and failures relating to water damage are also investigated in this chapter.

In Chapter III, high, intermediate and low temperature behaviour of asphalt cement is summarized and the behaviour relating to film thickness is explained in detail.

Aging phenomenon and factors affecting the aging of hot mix asphalt are explained in details in Chapter IV. Aging of asphalt binder during storage, mixture with aggregate, transportation to jobsite, compaction and service life of the pavement is also explained. Recent studies about the aging of asphalt binder as well as the hot mix asphalt are outlined. Parameters, which have an influence on short and long-term aging of asphalt paving mixtures, are also investigated including literature review.

In Chapter V, moisture related failures in pavements are described in detail. Factors like type of aggregate; asphalt, environment and traffic, which influence the degree of moisture damage, are defined in this chapter. In addition, mechanical tests used to evaluate the susceptibility of a compacted mixture to moisture damage are explained in detail.

The equipments and the method related to the experiments are presented in Chapter VI. After the specifications related to asphalt and aggregate are given, asphalt contents required to achieve asphalt film thickness are calculated.

Experiments conducted are presented in Chapter VII. In the first part of this chapter, resilient modulus and indirect tensile strength test are conducted on low and high air voids compacted specimens, aged for short and long term, which are prepared by using Superpave Gyratory Compactor. Regression analysis and quadratic functions are obtained between the asphalt film thicknesses and resilient and indirect tensile strength characteristics of the aged samples.

In the second part of Chapter VII, moisture susceptibility characteristics of the samples compacted with different asphalt film thicknesses are evaluated. Indirect tensile strength test is conducted on dry and conditioned samples. Relationship between the asphalt film thickness and the ratio of indirect tensile of the conditioned to unconditioned samples is determined.

Results obtained from the experiments conducted in the above section are presented in the last chapter. An optimum asphalt film thickness of 9-10 microns is indicated in the plotted asphalt film thickness versus resilient modulus and indirect tensile strength figures of short and long term aged samples. And also from the asphalt film thickness versus indirect tensile strength of conditioned and dry samples figure, 9.5-10.5 micron optimum asphalt film thickness is achieved. Conclusions are drawn and suggestions for future works are also presented in this chapter.

1. GİRİŞ

Dünyadaki sorunların başında, petrol ve beraberinde getirdiği problemler gelmektedir. Günümüzde, ulaşımdan enerjiye kadar günlük yaşantımızın her aşamasında petrolün etkisi görülmektedir. Yeryüzündeki petrol rezervlerinin gün geçtikçe tükenmesi ve geriye kalan miktarının da belli ülkelerin tekelinde olması, pek çok ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Petrol kaynaklarını kontrol altında tutma isteği, geçmişte olduğu gibi günümüzde de ülkeler arasındaki sorunların asıl nedenini oluşturmaktadır.

Petrol gereksiniminin ancak %10'unu kendi yeraltı kaynaklarından karşılayan ülkemiz bu sıkıntıları yaşamakta ve ulaşımdan enerji üretimine kadar her sektör bu durumdan olumsuz yönde etkilenmektedir.

Karayolu Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğu altında 31.376 km devlet yolu, 29.929 km il yolu bulunmakta olup, 1851 km otoyollar da ilave edildiğinde toplam yol ağı 63.156 km'ye ulaşmaktadır. Bu karayolu ve otoyolların tamamına yakını asfalt kaplamadır (Karayolları Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı, 2002). Otoyollar gibi altyapı harcamalarının da çok büyük maliyetler gerektirdiği yüksek standartlı yollarda, toplam maliyetin %15-25'i gibi büyük bir bölümü bitümlü karışımlarla yapılan üstyapı tabakaları, bitümlü karışım maliyetlerinin de %35-40'ını bitümlü bağlayıcı maliyeti oluşturmaktadır.

Ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesi ile toplumların konforlu, güvenli sürüş kalitesi talebi, yol üstyapılarının daha yüksek performanslı ve bozulmalara karşı daha dirençli olarak tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir.

Trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki artışlar, üretim hataları ve iklim koşulları, yollarda tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları ve suya karşı duyarlılık gibi bozulmalara sebep olmaktadır. Kaplamanın öngörülen ömür ve konfor düzeyinin sağlanması, büyük ölçüde karışımlarda kullanılan bitümlü

bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri yaşlanmadır.

Yaşlanma, özellikle oksidasyon nedeni ile asfaltın sertleşmesi, kırılgan hale gelmesi ve bağlayıcılık özelliğinin kaybolması olarak tanımlanmaktadır (Bell ve diğ.,1994a). Bitümlü bağlayıcının yaşlanma özelliğinin bilinmesi, yukarıda belirtilen bozulma karakterlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Yaşlanma, bağlayıcıların kimyasında ve yüzey enerjilerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Bu durum da bağlayıcıların sertliğini arttırmakta ve suya karşı duyarlılığı etkileyebilmektedir. Suya karşı duyarlılık, suyun varolduğu durumlarda, bitümlü sıcak karışımda agrega yüzeyi ile bitümlü bağlayıcı arasındaki bağın zayıflaması olarak tanımlanmaktadır (Kennedy, 1989).

Asfalt film kalınlığı karışımdaki bağlayıcı içeriği ile ilişkilidir ve bu kalınlığın optimum değerinin saptanması son derece önemlidir. Çünkü, film kalınlığının gerekenden fazla olması, kaplamanın deformasyon direncini azaltacak; film kalınlığı gerekenden az ise kaplama kırılgan olacaktır.

Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisi bilinmesine rağmen, suya karşı duyarlılık ile ilişkisi incelenmemiştir. Ancak birçok durumda suya karşı duyarlılık ile yaşlanma etkileri kaplamalarda aynı anda gözlenmektedir.

Bu çalışmada, asfalt film kalınlığının ve hava boşluk oranının, bitümlü sıcak karışımların, kısa dönem (karıştırma, taşıma ve sıkıştırma sırasında) ve uzun dönem (servis ömrü boyunca) yaşlanma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca hava boşluğu oranı sabit tutulmak sureti ile, farklı film kalınlıkları ile hazırlanan karışımlar üzerinde suya karşı duyarlılık analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, asfalt film kalınlığı ile yaşlanma ve suya bağlı bozulmalar arasında ilişki kurulmaya çalışılmış ve optimum asfalt film kalınlığı saptanmıştır.

2. BİTÜMLÜ KAPLAMALARDA BOZULMALAR

Bir yol ne kadar iyi yapılırsa yapılsın, servis ömrü içinde beklenmedik çevresel faktörler sonucu bozulmaya başlar. Yolun servis ömrünü uzatmanın tek yolu, yeterli düzeyde sürekli bakım yapmak ve yol üstyapısının dayanımını onarım yöntemleri ile yükseltmektir. Uygun onarım yönteminin seçimi de bozulmanın derecesine bağlı olarak yapılır.

Bozulmalar aşağıdaki nedenlere bağlıdır:

- Trafik tahmininin uygun yapılmaması,
- Tasarım ve yapım hatalarının etkisi,
- Malzemenin yanlış seçimi,
- İklim ve çevre etkisi,
- Yolu kullanım hataları (Uluçaylı, 1976) (Tunç, 2001).

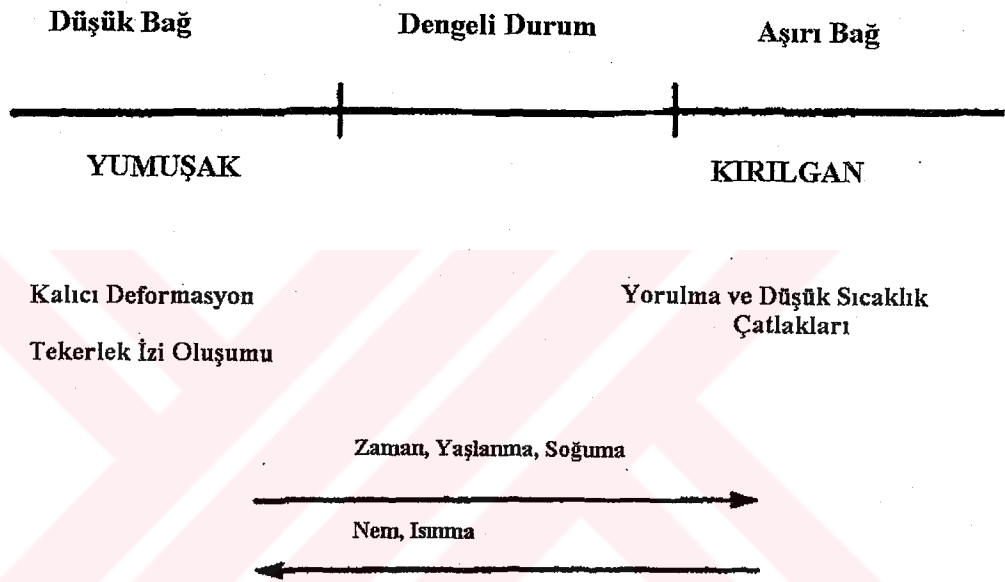
Bitümlü kaplamalarda bozulma çeşitleri pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve sınıflara ayrılmıştır. Strategic Highway Research Program (SHRP) A-417 (1994)'e göre bozulmalar:

- Kalıcı deformasyonlar,
- Yorulma çatlakları,
- Düşük sıcaklık çatlakları,
- Suya bağlı bozulmalar

olarak dört bölümde incelenmektedir. Ayrıca bitümlü bağlayıcının yaşlanması da bozulmalar üzerinde etkilidir.

Jones (1999), SHRP Memorandum'unda bozulmaları daha geniş bir sınıfta değerlendirmiştir. Bu değerlendirme kapsamında bozulmaları; kalıcı deformasyonlar, tekerlek izi oluşumu, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları, suya bağlı bozulmalar, adezyon kaybı olmak üzere altı bölüme ayırmıştır. Ayrıca bozulmaların, yoldan beklenen performans düzeyini düşürdüğünü belirtmiş ve performansı mekanik özellikler cinsinden ifade etmiştir (Şekil 2.1).

PERFORMANS



Şekil 2.1 Bozulmalara bağlı performans (Jones, 1999)

Şekil 2.1'de yumuşak ya da sert bağlayıcıların kullanılması halinde meydana gelen bozulma türleri ile zaman, sıcaklık ve oksidasyonun performans üzerindeki etkileri verilmektedir.

Brown (2001), yaşlanma olayını genel sınıflandırmanın dışında tutarak, bozulmaları üç bölümde incelemiştir:

1-Kalıcı Deformasyon

- Tekerlek izi
- Çökmeler
- Kabarmalar

-Yığılmalar

-Ondülasyon

2-Çatlaklar

-Yorulma Çatlakları

-Düşük Sıcaklık Çatlakları

3-Suya Bağlı Bozulmalar

Bu çalışmada, günümüze en yakın olan çalışma olduğu için yukarıdaki sınıflandırma esas alınmıştır. Yaşlanma olayı bu tezin konusunu oluşturduğundan diğer bozulmalardan ayrı bir bölüm olarak ve ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1 Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi Oluşumu)

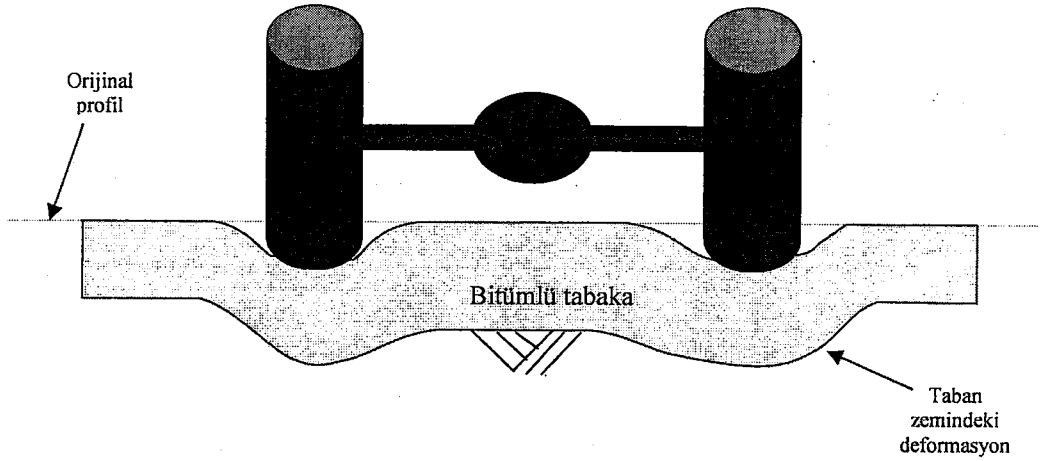
Tekerlek izi oluşumu (rutting), bitümlü kaplamalarda en sık görülen ve gerek teknik, gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bir bozulma tipidir. Kalıcı deformasyon, yol yüzeyine etkileyen yükün her bir uygulamasında, geri dönüşü olmayan küçük miktardaki deformasyonların yığılması biçiminde tanımlanmaktadır (Topal, 2001).

Bu tip deformasyonlar, özellikle arızalı araziye sahip, trafiği ağır ve sıcak ülkelerde problem olmaktadır. Türkiye'yi de bu ülkelerden biri saymak yanlış olmaz. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir bölümünde ya da sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğmaktadır. Kalıcı deformasyonların genellikle iki ana sebebi vardır. Bunlar:

-Alt tabakalara bağlı nedenler

-Bitümlü tabakalara bağlı nedenler

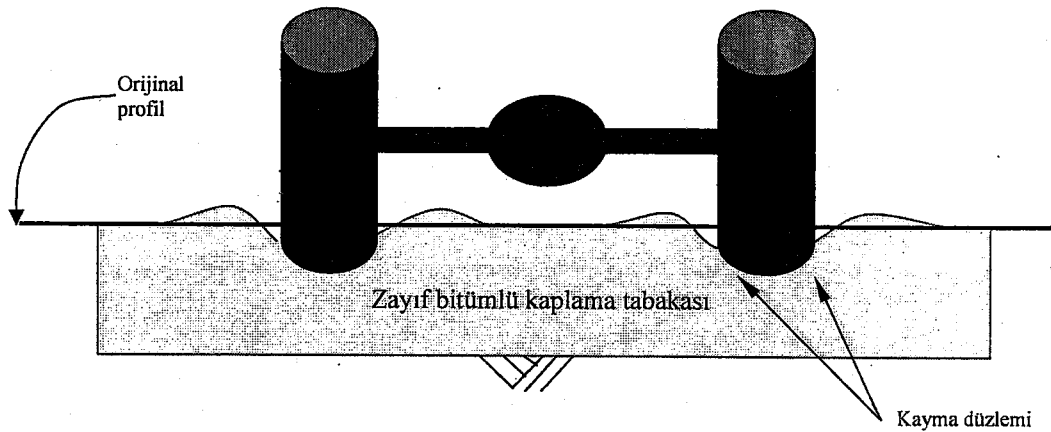
Alt tabakalara bağlı tekerlek izi oluşumu, bitümlü tabakanın altındaki temel veya alt temel tabakalarında çok fazla tekrar eden gerilmeler sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Zayıf Alttemele bağlı tekerlek izi oluşumu (Asphalt Institute, 1996)

Temel ve alt temelde sert malzemelerin kullanımı kısmen alt tabakalara bağlı deformasyonu azaltsa da , bu durum malzemeye bağlı bozulmadan çok, yapısal bir bozulma olarak kabul edilmektedir ve geniş tekerlek izleri oluşmaktadır. Kaplama tabakasının nemden dolayı oluşan beklenmedik zayıflaması bu tip bozulmaları oluşturabilmektedir. Genel olarak alt tabakalara bağlı bozulma sebepleri; alt tabaka kalınlıklarının yetersiz olmasına veya taban zemininin konsolidasyonuna bağlıdır (Asphalt Institute, 1996).

Yüke bağlı gerilmelerin, kaplamayı oluşturan malzemelerin eşik stabilitelerini aşmasına bağlı olarak bitümlü tabakanın tek başına çökmesi, bitümlü tabakalara bağlı deformasyonu oluşturmaktadır. Bu tip bozulmalarda, tekerlek izi genişliği, diğer bozulmaya oranla fazla değildir, ancak kenarlara doğru tümsekler oluşmaktadır



Şekil 2.3 Zayıf karışıma bağlı tekerlek izi oluşumu (Asphalt Institute, 1996)

Bitümlü tabakalara bağlı bozulmalar genellikle yüksek kaplama sıcakları altında, bitümlü kaplamanın yüzeyinde oluşmaktadır. Bu, tekerlek izi oluşumunun sadece bitümlü bağlayıcı sorunu olarak düşünülmesine neden olsa da, aslında sorun bağlayıcı ile mineral agreganın birlikte davranışı olarak incelenmelidir (Asphalt Institute, 1996).

Bozulmalar kavşak girişlerinde, otobüs duraklarında, ağır taşıtların hız kestiği virajlarda ve dik eğimli yollarda görülmektedir (Verstraeten, 1994).

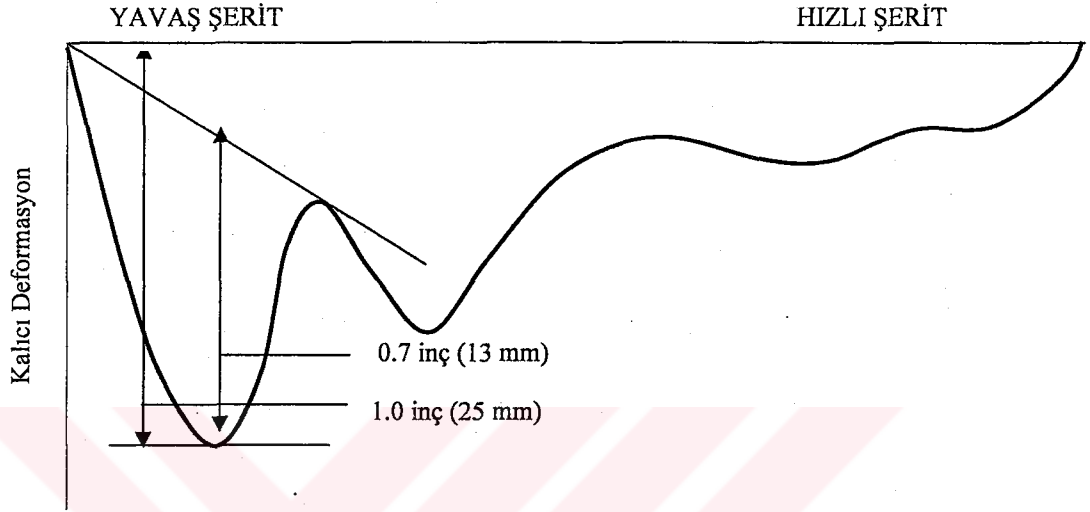
Tekerlek izi oluşumunu etkileyen sıcak karışım özellikleri ve yol koşulları Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1 Bitümlü tabakalarda kalıcı deformasyonu etkileyen faktörler (SHRP A-415, 1994)

	Faktör	Faktörde Değişme	Kalıcı Deformasyona Gösterilen Direnç
Agrega	Yüzey yapısı	Düzgünden pürüzlüye	Artma
	Gradasyon	Boşluklu gradasyondan sürekli gradasyona	Artma
	Şekil	Yuvarlaktan köşeliye	Artma
	Boyut	Maksimum dane boyutunda artış	Artma
Bağlayıcı	Sertlik	Artma	Artma
Bitümlü Sıcak Karışım	Bağlayıcı içeriği	Artma	Azalma
	Hava boşluk oranı*	Artma	Azalma
	Mineral agregası içindeki boşluk	Artma	Azalma
Yol Koşulları	Sıcaklık	Artma	Azalma
	Gerilme/deformasyon Durumu	Lastik basıncı (değme basıncı) artışı	Azalma
	Yük Tekrarı	Artma	Azalma
	Su	Kuru durumdan nemli duruma	Azalma (eğer karışım suya karşı duyarlı ise)
Trafik Koşulları	Hız	Hızda artma	Artma

*Hava boşluk oranı %3’ten az olduğunda, karışımların tekerlek izi potansiyelleri artmaktadır.

“Tekerlek İzi Derinliği” bir kaplamanın bozulma derecesini yansıtan bir ölçüt olarak birçok ülkede kullanılmaktadır. Derinliğe göre bakım, kaplama ve güçlendirme yöntemi belirlenmektedir. Tekerlek izine göre bozulma değerlendirilmesi ülkeden ülkeye değişmektedir. Tekerlek izi derinliği birçok ülkede 1.0 ile 2.5 cm. arasında değişmektedir.



Şekil 2.4 Tekerlek izi derinliğine bağlı bozulma durumu (Uluçaylı, 1976)

Örneğin, İngiltere’de tekerlek izi derinliği, orijinal kaplama yüzeyine göre 1 inç (2.5 cm), veya banket kenarından 2 m uzaklıkta düzgün kenara göre 0,7 inç (1,3 cm) değerine ulaşırsa kaplama bozulmuş kabul edilmektedir (Şekil 2.4) (Uluçaylı, 1976).

Bitümlü bağlayıcıların oksidasyonu, bitümlü kaplamalarda görülen tekerlek izi oluşumunu etkilemektedir. Oksidasyon bağlayıcının gevrekliğini arttıracığından kırılmalar oluşabilecektir. Buna karşın kalıcı deformasyona gösterilen direnç artabilmektedir.

2.2 Çatlaklar

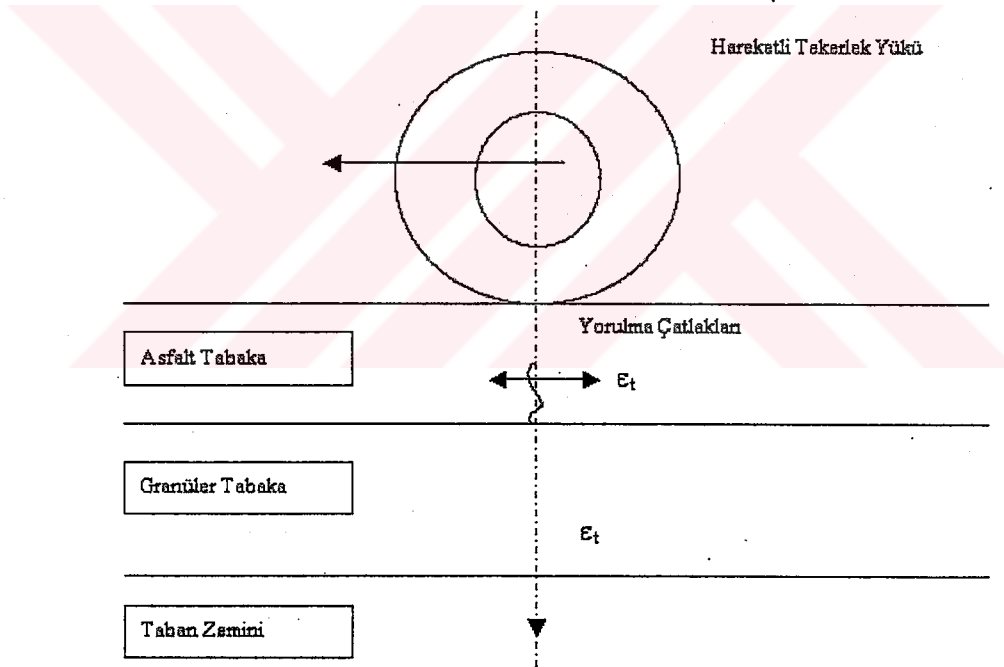
Çatlaklar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan bozulmalardır. Çatlaklar yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

2.2.1 Yorulma Çatlakları

Yorulma, tekrarlı yükler altında meydana gelmekte ve malzemelerin çekme gerilme direncinin aşılması sonucu kırılmayı ifade etmektedir (Pell, 1988).

Trafik yükleri altında, esnek yol üstyapısı, sürekli eğilmeye maruz kalmaktadır. Oluşan bozulmaların şiddeti, kaplamanın yapımına veya yapının rijitliğe bağlıdır. Yol üstünde yapılan analizler, tekerlek yüklerinden dolayı oluşan çekme birim şekil değiştirmelerin $30-200 \cdot 10^{-6}$ değerinde olduğu durumlarda, yorulma çatlaklarının oluştuğunu göstermektedir (Pell, 1988).

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, üstyapılardaki en büyük çekme gerilmesi, bitümlü kaplamanın tabanında, seyir doğrultusunda ve iki tekerlek aralığında oluşmaktadır. Çatlamlar aşağıdan yukarı doğrudur.



Şekil 2.5 Bitümlü kaplamalarda kritik birim şekil değiştirmeler ve yorulma çatlakları (Brown, 1980)

Yorulma çatlaklarını önlemek için, bitümlü karışımın belirli yorulma özelliklerine göre bileşimi tasarlanmalıdır. Bu özellik, çekme birim şekil değiştirmesi (ϵ_t) ile kırılmaya sebep olan yükleme sayısı (N_f) arasındaki ilişkiye bağlıdır (Brown, 1980).

$$N_f = C * \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^m \quad (2.1)$$

Bu formülde:

N_f = Yorulma çatlağı oluşturmaya başlatan yükleme sayısı

ε_t = Çekme birim şekil değiştirmenin maksimum değeri

c ve m = Karışımın özelliklerine ve bileşimine bağlı katsayılar. m değeri, yorulma ömrü- birim şekil değiştirme çizgi eğimidir.

Bu tip çatlaklar birbirleri ile bağlantılı olup timsah sırtı görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tümünde veya belirli kesiminde oluşmaktadırlar. Oturmada dolayı veya yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşan yorulma çatlakları, kılcal çatlaklar biçiminde yol eksenine boyunca düzensiz bir şekilde oluşmaktadırlar. Trafik etkisi ile bu düzensiz çatlaklar giderek büyümekte ve daha sonra enine oluşan çatlaklar ile birleşerek bloklar halinde timsah sırtı görünümüne dönüşmektedirler.

Oturmada dolayı oluşan timsah sırtı çatlaklar sivri köşeli ve düzensiz, yorulmadan dolayı oluşan timsah sırtı çatlaklar ise genellikle uniform, daha küçük boyutlarda ve bal peteği şeklinde görülmektedirler.

Bitümlü bağlayıcıların oksidasyonu, bitümlü sıcak karışımların yorulma özelliklerini etkilemektedir. Oksidasyon, kohezyonu arttırmakta ve karışımın sertliğini yükseltmektedir. Bunun sonucunda da tekerlek izi oluşumu azalmasına karşın, özellikle ince bitümlü kaplama yüzeylerinde yorulma çatlakları görülmektedir (Uluçaylı, 1976).

Karışımların yorulmaya karşı dirençlerinin artırılması için yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

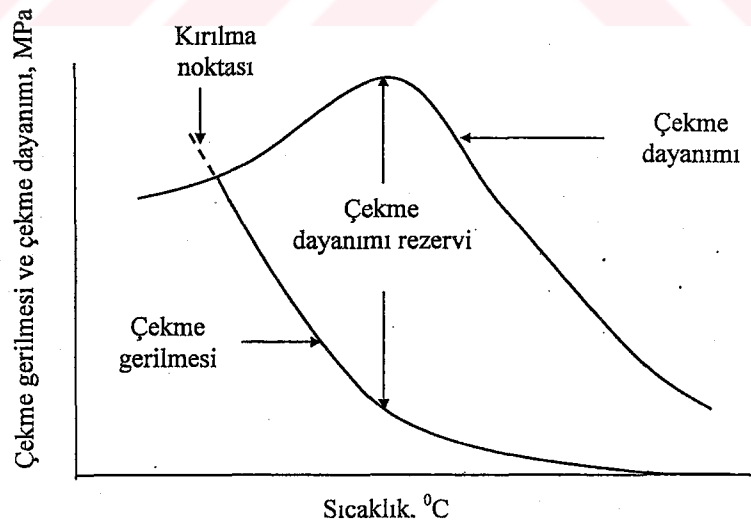
- Tasarımda ağır taşıt trafiği göz önünde bulundurulmalı,
- Kalın tabakalar kullanılmalı,
- Suyun etkisi ile zayıflayan malzemeler kullanılmamalı,

- Yapım sırasında iyi bir biçimde sıkıştırma sağlanmalı (düşük hava boşluk %si),
- Optimum bağlayıcı içeriği arttırmalı (yaklaşık %1)
- Daha yoğun gradasyon (yorulma bakış açısı ile) kullanılmalı,
- Daha yumuşak bitümlü bağlayıcı kullanılmalı (Uluçaylı 1976) (Asphalt Institute, 1996).

2.2.2 Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, soğuk havalarda bitümlü kaplamanın büzülmesi ile oluşmaktadır. Dolayısı ile bu tip çatlaklar diğer çatlaklara kıyasla trafik etkilerinden değil, iklimsel etkiler ile oluşmaktadır. Düşük sıcaklık altında oluşan çekme gerilmeleri, bitümlü kaplamanın çekme mukavemetini aştığında bu tip çatlaklar oluşmaktadır. Özellikle yaşlanmış bitümlü kaplamalar bu tip çatlakların oluşmasına yatkındır. Çatlakların genel özelliği enine yönde ve yukarıdan aşağı doğru olmasıdır (Zeng, 1995).

Sıcaklığa bağlı olarak kaplamada meydana gelen çekme gerilmeleri ve kırılma sıcaklığı Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6 Sıcaklığın fonksiyonu olarak tabaka içinde ortaya çıkan çekme gerilmesi ve kaplamanın çekme mukavemeti (Stock ve Arand, 1993)

Şekilde, çekme mukavemeti rezervi gösterilmektedir. Bu kavram, kırılma sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda trafik etkileri ile meydana gelen çekme gerilmelerine karşı bitümlü kaplamaların dayanım ölçüsü olarak düşünülebilir (Stock ve Arand, 1993).

Genel olarak bitümlü kaplamaların düşük sıcaklık altındaki davranışlarını etkileyen faktörler dört bölüm altında Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler (Isaccson ve diğ., 1997)

Faktörler	Etkileri
1.Malzeme	
1.1.Bitümlü Bağlayıcı (Kıvamı,Rijitlik, viskozite ve penetrasyon) Sıcaklığa Karşı Duyarlılık	Çok Büyük Çok Büyük
1.2.Agrega Tipi (Şekli, Yüzey Yapısı ve Porozite)	Yok Sayılacak Kadar Düşük
1.3.Bitümlü Sıcak Karşımın Kompozisyonu Bitümlü Bağlayıcı Oranı Agrega Gradasyonu Filler Oranı Hava Boşluk Oranı	Küçük (yaşlanmamış),Büyük (yaşlandırılmış) Küçük Daha Fazla Çekme Birim Şekil Değiştirme
1.4.Bitümlü Karşım Özellikleri Rijitlik Çekme Mukavemeti Termal Büzülme Katsayısı	Küçük (yaşlanmamış), Büyük (yaşlandırılmış) Çok Büyük Düşük
1.5.Karşım veya Bitümlü Bağlayıcı Katkı Maddesi	Büyük Orta
2.Çevresel Faktörler	
2.1.Sıcaklık	Çok Büyük
2.2.Soğuma Oranı	Büyük
2.3.Oksidasyon	Çok Büyük
3.Üstyapı Faktörleri	
3.1.Kaplama Genişliği	Bilinmiyor
3.2.Kaplama Kalınlığı	Orta-Büyük
3.3.Bitümlü Tabaka ile Temel Tabakası Arasında Sürtünme Katsayısı	Orta Küçük
3.4.Taban Zemin Tipi	
4.Diğer Faktörler	
4.1.Kaplama Yaşı	Çok Büyük
4.2.Trafik Etkileri	Bilinmiyor
4.3.Yapım Etkileri	Bilinmiyor

Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, bitümlü bağlayıcı özellikleri, bitümlü kaplamalarda oluşan düşük sıcaklık çatlakları bakımından büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, bitümlü bağlayıcının rijitlik, penetrasyon ve yumuşama noktası gibi reolojik parametrelerinin karşımın kırılma sıcaklığındaki davranışları üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Zeng, 1995). Örneğin karışımlarda bitümlü bağlayıcının yaşlanma özelliği dikkate alınmalıdır. Çünkü okside olmuş,

yani yaşlanmış bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha duyarlıdırlar. Bu tip bozulmaları önlemek için sıcaklığa karşı duyarlılığı az olan ve daha yumuşak bitümlü bağlayıcı seçilmelidir. Bitümlü sıcak karışımlarda nem veya suya bağlı bozulmalar “soyulma” olayı ile incelenmektedir.

2.3 Suva Bağlı Bozulmalar

Bitümlü kaplamalarda soyulma, suyun varolduğu durumlarda, sıcak bitümlü karışımda agrega yüzevi ile bitümlü bağlayıcı arasındaki bağın zayıflaması şeklinde tanımlanmakta ve bitümlü kaplamanın stabilitesine etki eden faktörlerden biri kabul edilmektedir (Stuart, 1990).

Suva bağlı bozulmalar tezin ana konularından biri olduğu için, bu tip bozulmalara etki eden faktörler ve yapılan deneysel çalışmalar 5. ve 7. bölümlerde ayrıntılı bir biçimde incelenecektir.

3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICI DAVRANIŞI

Asfalt, American Society for Testing Materials (ASTM) tarafından “rengi koyu kahverengiden siyaha kadar değişen, ana maddesi bitüm olan ve doğal halde bulunan ve rafinerilerde petrolün işlenmesi ile elde edilen bağlayıcı madde” olarak tarif edilmektedir (ASTM, 1994). Dayanıklılığı, güçlü yapışma özelliği ve geçirimsizliği nedeni ile bağlayıcı madde olarak değer kazanmıştır. Bitümlü bağlayıcılar, çok karmaşık bir kimyasal yapıya sahip olmaları nedeni ile mühendislik özellikleri daha çok fiziksel özellikleri ile belirlenmektedir. Bitümlü bağlayıcılar:

- Karbon: %80-%85
- Hidrojen: %7-12
- Nitrojen: %0-1
- Sülfür: %1-7
- Oksijen: %0-5
- Çok az miktarda metaller (oksit, tuz veya metal içeren organik bileşikler halinde)

gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Simpson, 1960). Görüldüğü gibi bitümlü bağlayıcı ağırlığının %90-95'i karbon ve hidrojenden oluşmaktadır. Bu özelliği sebebi ile bitümlü bağlayıcı bir hidrokarbondur. Geriye kalan bölümü ise, heteroatom ve metal olan iki tip atomdan oluşmaktadır. Azot, oksijen ve kükürt gibi heteroatomlar bağlayıcının molekül yapısı ile karbonun yerini almaktadırlar. Bu durum da bağlayıcının kimyasal ve fiziksel özelliklerinde farklılıklara neden olmaktadır.

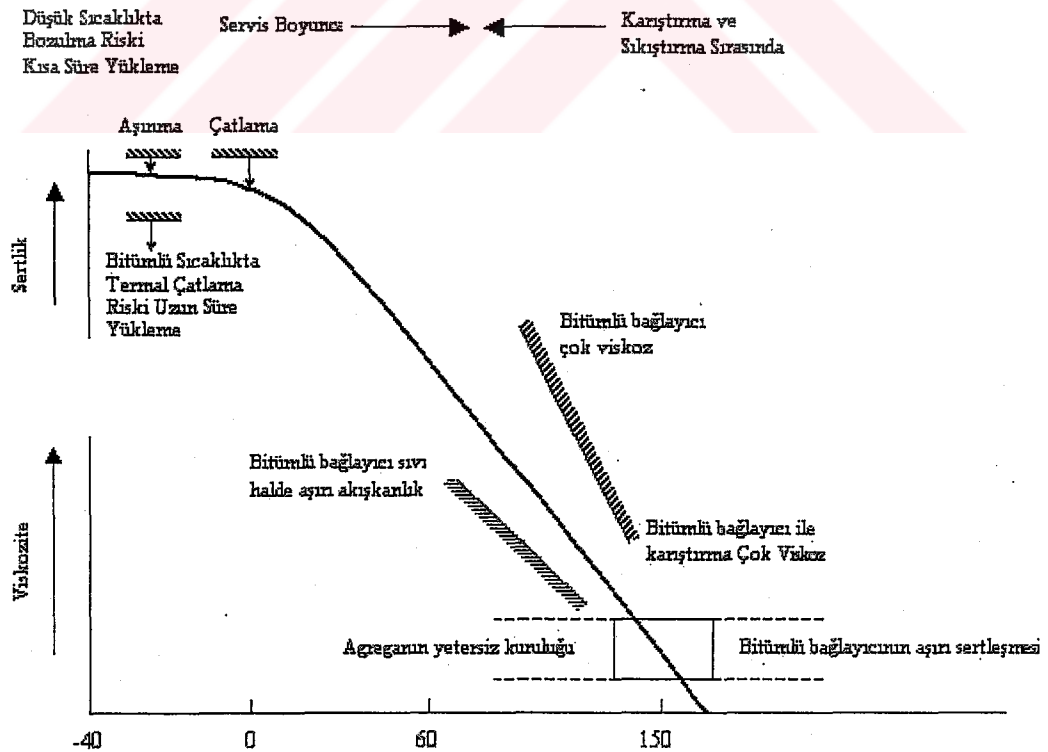
Bitümlü bağlayıcının molekül yapısı da son derece karmaşıktır. Genelde alifatikler, aromatikler ve heterosiklik olmak üzere üç ana molekül yapısı vardır (Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996). Alifatikler (parafinikler) lineer, üç boyutlu ve zincir yapıdadırlar ve doğada yağlı veya cilalı halde bulunurlar. Heterosiklikler

(naftenikler) üç boyutlu ve değişik atomların bağlı olduğu karbon atomu halkalarıdır. Aromatikler ise yassı, keskin bir kokuya sahip, birbirine kolayca bağlanabilen kararlı atom halkalarıdır. Bütün bu molekül cinsleri birbirlerini değişik şekillerde etkilemekte ve bitümlü bağlayıcının fiziksel ve kimyasal davranışlarına etki etmektedirler. Aşağıda, bitümlü bağlayıcın davranışları, sıcaklığa ve film kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir.

3.1 Bitümlü Bağlayıcının Sıcaklığa Bağlı Davranışı

Bitümlü bağlayıcılar visko-elastik malzemelerdir ve davranışları, yük durumuna ve değişik sıcaklıklara bağlı olarak viskozdan elastığe kadar değişebilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların karıştırılması ve sıkıştırılması sırasında özellikleri viskozite cinsinden, servis ömürleri boyunca ise sertlik modülü cinsinden ifade edilmektedir (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

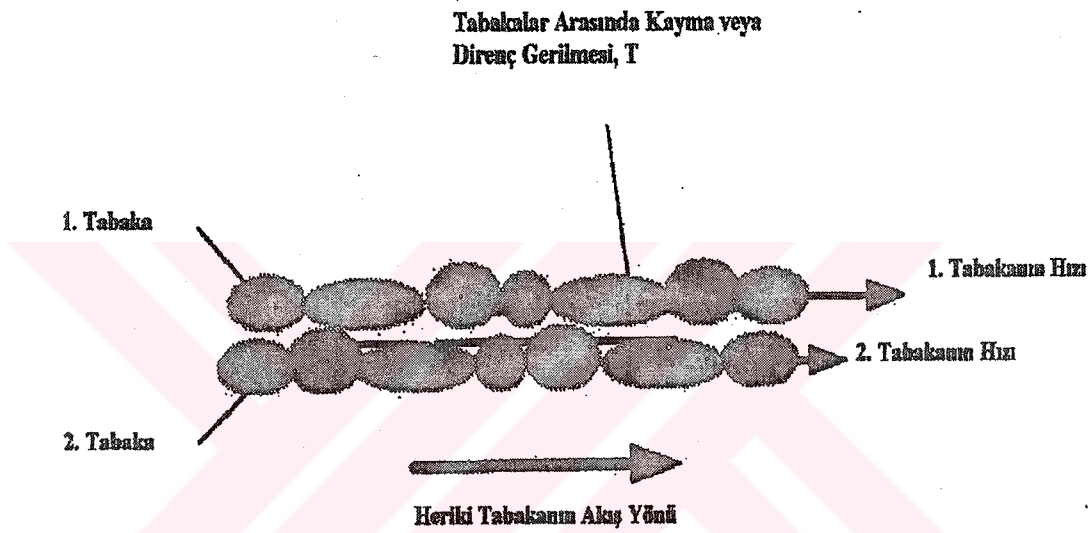
Bitümlü bağlayıcıların yapım ve servis ömürleri boyunca gösterdikleri davranışlar Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Bitümlü bağlayıcının yapım ve servis ömrü boyunca gösterdiği özellikler (The Shell Bitumen Handbook, 1990)

3.1.1 Yüksek Sıcaklıklardaki Davranış

Çok sıcak koşullarda ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır taşıtlar gibi sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda bitümlü bağlayıcı kıvamlı bir sıvı (viscous liquid) gibi davranmaktadır. Bu koşullarda, bitümlü sıcak karışımın yük taşıyan kısmı agregadır. Viskozite, sıvıların akmaya karşı gösterdikleri dirençleri açıklayan fiziksel bir özelliktir. Şekil 3.2’de çok yavaş akış gösteren bağlayıcının, bitişik molekül tabakalarının, birbiri üzerinde kaydıkları görülmektedir.



Şekil 3.2 Sıvı akış özelliklerinin mikroskobik görüntüsü (Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996)

Tabakalar arasındaki kayma direnci kuvveti (sürtünme) birbirleri üzerinde kayan tabakaların bağıl hızlarına bağlıdır. Üstteki tabaka alttaki tabakayı ileri doğru çekmeye çalışırken, alttaki tabaka kendi üstündeki tabakayı yerinde tutmaya çalışmaktadır. Direnç kuvveti ve bağıl hız, sıvı tiplerine göre oldukça farklılıklar göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların gösterdikleri bu farklılıklar viskozite ile açıklanabilmektedir. Aşağıdaki bağıntı, Şekil 3.2’deki durumu tanımlamakta ve farklı sıvılar arasındaki akış özelliklerinin açıklanmasında viskozitenin (η) nasıl kullanılacağını göstermektedir (Monismith, 1961).

$$T = \eta * \frac{d\gamma}{dt} \quad (3.1)$$

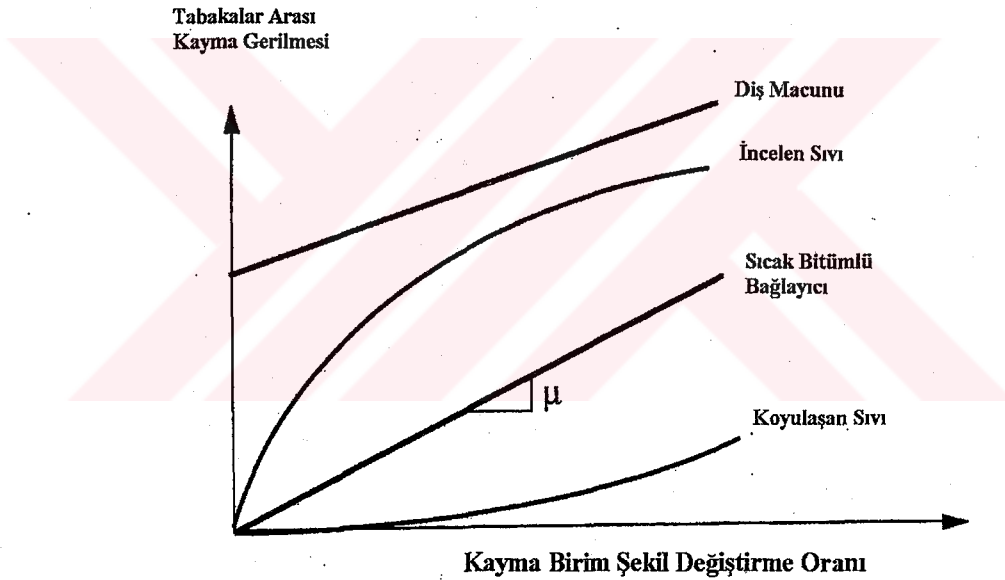
Yukarıdaki eşitlikte:

T = Tabakalar arasındaki kayma direnci (kg/cm^2),

η = Viskozite katsayısı (poise),

$\frac{d\gamma}{dt}$ = Kayma birim şekil değiştirme oranıdır.

Kayma birim şekil değiştirme oranı, 1.tabakanın 2. tabaka üzerinde kaydığı bağıl hızdır. Şekil 3.3 değişik malzemelerin viskoz davranışlarını göstermektedir. Eğrilerin eğim değerleri, her bir malzemenin viskozite değerini vermektedir.



Şekil 3.3 Değişik sıvıların viskozite özellikleri (Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996)

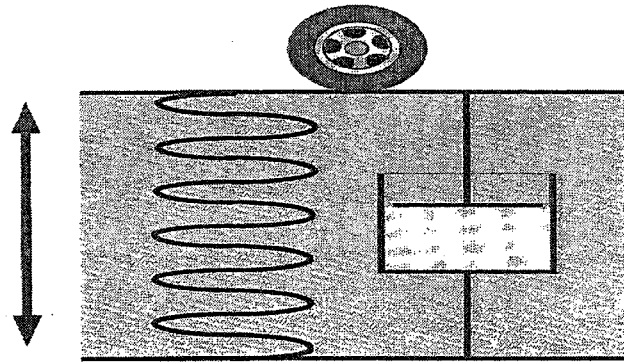
Newton akışkanlarında, direnç kuvveti ile bağıl hız arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Hava, su ve 60°C 'den yüksek sıcaklığa sahip bitümlü bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda Newton akışkanı gibi davranmaktadırlar. Orta sıcaklıktaki bitümlü bağlayıcının, viskozitesi düşerken, bağıl hızı arttığı için "incelen sıvıdır". Bazı modifiye bağlayıcılar da bu grup içine girmektedirler. Koyulaşan sıvılarda ise; tabakalar arasında viskozitenin artışı ile bağıl hız da artmaktadır.

Sıcak bitümlü bağlayıcılar gibi viskoz davranış gösteren malzemeler akmaya başladıklarında orijinal durumlarına geri dönemedikleri için plastik olarak nitelendirilmektedirler. Bu nedenle, sıcak iklim koşullarında ve özellikle sık tekrar eden yükler altında tekerlek izi oluşumu (rutting) görülmektedir.

Karışımların hazırlanması ve daha sonra yol kaplamasının yapısında göstereceği özelliklerinin doğru olarak tahmin edilebilmesi için bitümlü bağlayıcının viskoz haldeki özelliklerinin gözönüne alınması gerekmektedir. Bu özellikler de, karışım içinde agregaların bağlayıcı tarafından tamamen sarılması, mümkün olan en kısa sürede ve sıcaklıkta karışımın hazırlanması gibi faktörleri etkilemektedir.

3.1.2 Orta Sıcaklıklardaki Davranış

Bu tür iklime sahip bölgelerde hem kıvamlı sıvı hem de elastik katı özellik gösteren bitümlü bağlayıcı, esnek yol üstyapılarında kullanılmaya olanak veren mükemmel bir bağlayıcı malzemedir. Bitümlü bağlayıcı ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edilebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin bitümle kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkan tanıyan bir yağlayıcı gibi davranmaktadır (Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996). Soğuduğunda ise agregaları bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Bu nedenle bitümlü bağlayıcı davranışı viskoelastik olarak tanımlanmaktadır. Viskoelastik malzemeler; özellikle hızlı yüklendikleri zaman elastik, yavaş yüklendikleri zaman viskoz davranış göstermektedirler (Ağar, 1975). Yüklere gösterdiği bu davranış kavramsal olarak aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 3.4). Bu model, yay-amortisör modeli ile açıklanmaktadır.



Şekil 3.4 Viskoelastik davranış modeli (Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996)

Bitümlü bağlayıcıya uygulanan herhangi bir kuvvet, yay ve amortisörde paralel bir tepkiye neden olmaktadır. Sıcak bitümlü karışımında bağlayıcı ile agreganın ilk elastik tepkisi, yay ile temsil edilmektedir. Amortisör ise, bağlayıcının özellikle daha sıcak havalardaki yavaş viskoz tepkisini temsil etmektedir. Bazı hallerde plastik davranış gösterse de, bitümlü bağlayıcının gösterdiği tepkilerden çoğu elastik veya viskoelastiktir.

3.1.3 Düşük Sıcaklıklardaki Davranış

Kış günleri gibi soğuk iklim şartlarında yada hızlı hareket eden trafik yükleri altında bitümlü bağlayıcı elastik katı (gevrek elastik) bir davranış göstermektedir. Bu gibi durumlarda, bağlayıcı billursu yoğun bir yapıya sahiptir. Kauçuk ve benzeri elastik katılar, yüklendiklerinde şekil değiştirmekte ancak yük kaldırıldığında eski orijinal hallerine geri dönmektedirler. Malzemenin, dayanım kapasitesinden daha fazla miktarda yükleme yapıldığında ise, kırılma ve kopma olayı gerçekleşmektedir.

Bitümlü bağlayıcı, soğuk havalarda elastik katı davranış gösterse de aşırı yüklendiğinde kırılma olabilir veya çatlayabilir. Bu yüzden bitümlü kaplamalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülmektedir. İlerideki bölümlerde de görüleceği gibi, kaplamalarda görülen düşük sıcaklık çatlakları, bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki gösterdiği davranışlarla yakından ilgilidir (Isacsson ve Zeng, 1997).

3.2 Bitümlü Bağlayıcının Film Kalınlığına Bağlı Davranışı

Bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen moleküller arası kuvvetler ile bitümlü sıcak karışım davranışları, bilim adamları tarafından uzun zamandır incelenmesine rağmen daha çok karışımların mekanik yapısı üzerinde durulmuş ancak bağlayıcı ile agrega arasındaki film kalınlığının kimyasal ve fiziksel özellikleri değerlendirilmemiştir (SHRP-A-341; 1993).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, asfalt bileşenlerinin büyük bir kısmının agrega yüzeyi tarafından emildiğini ve agrega ile asfalt yüzeyi arasında kimyasal reaksiyonların olduğunu göstermiştir. İnce film tabakalarında görülen bu reaksiyonlar yeni dinamik davranışların ortaya çıkmasına yol açmıştır. Viskozitenin

gözle görülür bir biçimde artması ve agrega yüzeyindeki film tabakasında elastik kuvvetlerin oluşumu bu davranışların başlıcalarıdır (Huang ve diğ., 1998).

Fink ve Griffin (1961), çeşitli film kalınlıklarda bağlayıcı kıvamını ölçmek için cam lamalı kayan viskometre aletini kullanmışlardır. Film kalınlığının 20 μ m'den düşük olduğu durumlarda, viskozite değerinin hızla arttığını gözlemlemişlerdir.

Scholz ve Brown (1996), modifiye edilmiş dinamik kayma reometresi aracılığı ile asfalt-agrega ara fazını incelemişler ve mineral agregaların bağlayıcının reolojik özelliklerini etkilediğini belirlemişlerdir.

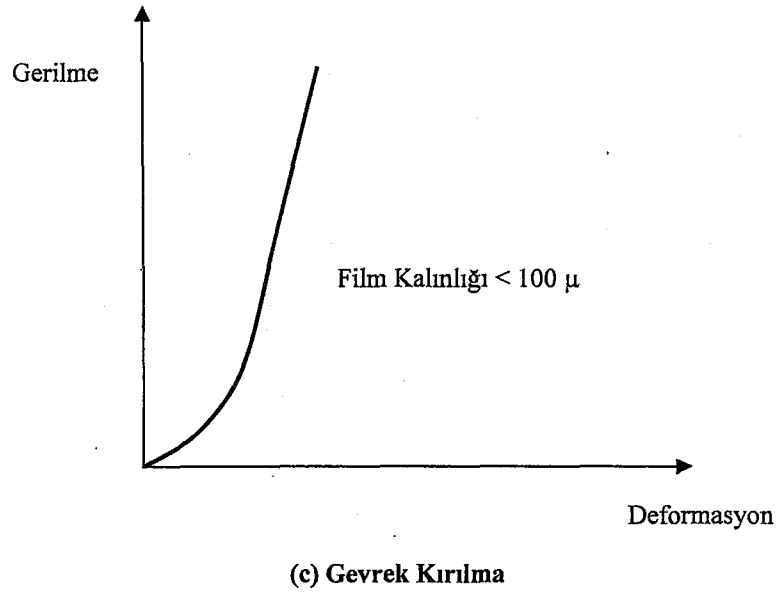
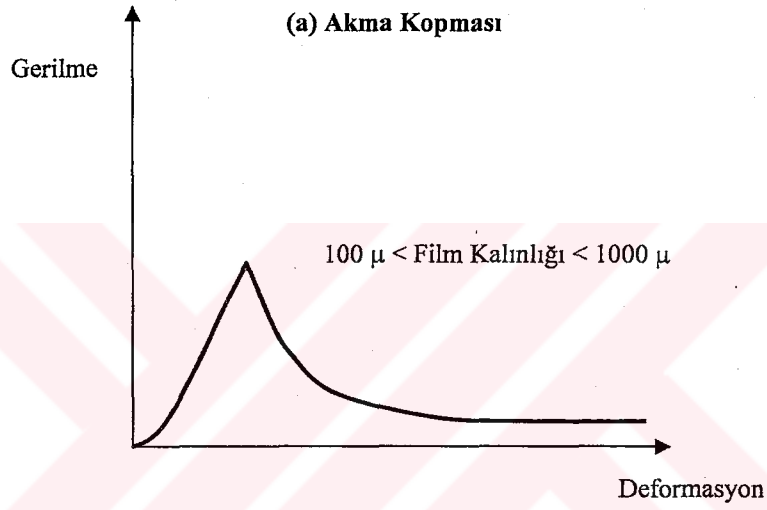
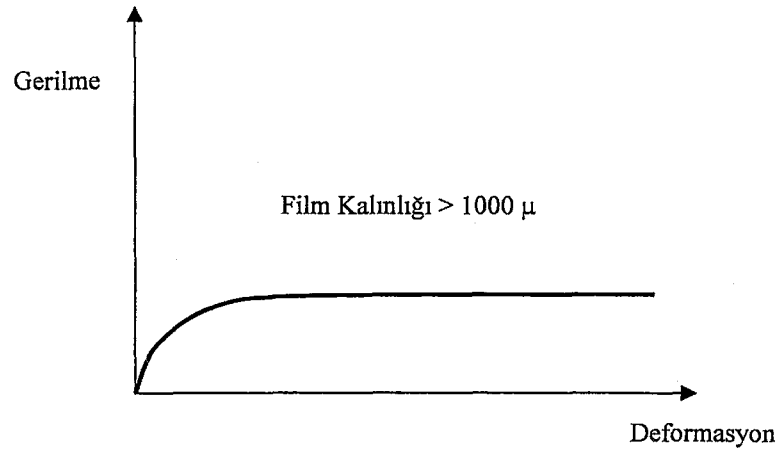
Bikerman (1966) ve Mack (1957), agrega yüzeyine bitişik bağlayıcı filminin kütle halindekinden çok farklı özellikler ortaya koyduğunu belirlemişlerdir.

Yapılan araştırmaların çoğu; bitümlü kaplama özelliklerinin bağlayıcının ince film halindeki yapısal özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir. Bu özelliklerin başında çekme direnci gelmektedir.

Bitümlü bağlayıcının çekme ve kopma direnci kolloidal yapıda olması nedeni ile bağlayıcının özellikleri çok karışıktır. Hidrokarbonlu bir bağlayıcı kolloidal yapısı sebebi ile, belirli dinlenme süresinden sonra, sünger şeklini andıran, üç ekseninde gerilmiş ağ biçiminde tiksotropik bir yapı kazanmaktadır. Ancak, dış kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerin, ağ topluluğunun direncini aşması halinde bu özellik bozulmakta ve bağlayıcı plastik deformasyona uğramaktadır. Böyle bir rijitliğe sahip bulunan asfalt filmi, çekme gerilmeleri altında çeşitli şekillerde kopmaktadır (Ağar, 1975).

Bağlayıcıların çekme dirençlerinin film kalınlıklarına bağlı olarak değişimi Şekil 3.5'te verilmektedir.

Kalın film halindeki bitümlü bağlayıcı plastik madde gibi davranmaktadır. Çekme gerilmesi uygulandığı zaman bağlayıcıda oluşan kayma gerilmeleri, bağlayıcının kayma direnci çekme direncine göre küçük olduğundan, filmin akma yoluyla kopmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.5 (a)'da görüldüğü gibi kalın asfalt filmlerinde çekme gerilmelerinin uygulanması ile plastik deformasyonlar başlamakta ve film akma ile kopmaktadır.

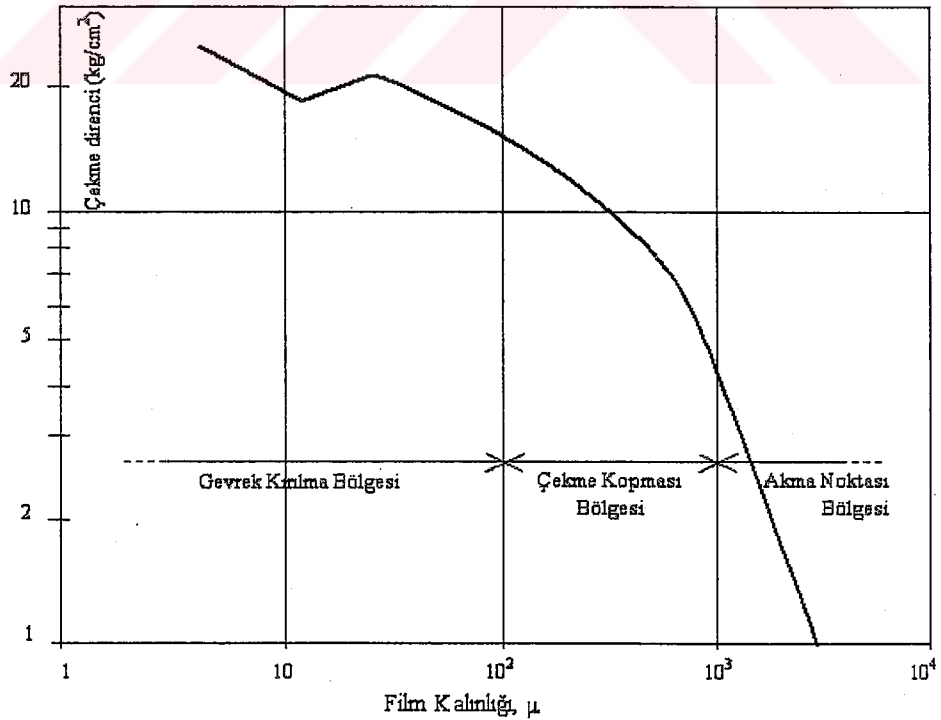


Şekil 3.5 Değişik kopma şekillerine göre asfalt filmlerinin gerilme deformasyon eğrileri (Ağar, 1975)

Orta kalınlıktaki asfalt filminde, filmin iki uçtan yapıştığı çekme elemanları bitümlü bağlayıcının çekme elemanları, bağlayıcının enine deformasyonlarını kısıtladığından, kayma gerilmeleri azalmaktadır. Bu halde filmin kopması çekme direncine bağlıdır. Film kalınlığı azaldıkça, filmin çekme direnci artmaktadır (Şekil 3.5 (b)).

İnce filmlerde enine deformasyon büyük ölçüde önlenmiş olduğundan bağlayıcıda üç eksenli çekme durumu doğmakta ve kopma, önemli bir plastik deformasyon olmadan ani olarak meydana gelmektedir (Şekil 3.5 (c)). Bu halde asfalt filminin davranışı duktıl olmayan katı bir cisim gibidir ve kopma gevrek kırılma şeklindedir. Filmin içindeki çatlak ve oyuklar gerilme yığılmasına ve bunun sonunda da kopmaya sebep olmaktadır.

Asfalt filminin çok incilmesi ile enine deformasyon tamamen önleneceğinden hidrostatik dirence ulaşılacaktır. Bu halde asfalt filminin kopmasına yine çatlak ve oyuklar sebep olmaktadır. Ancak, film kalınlığının son derece azalması ile bu çatlak ve oyukların sayısı giderek azalacak ve filmin çekme direnci, moleküller arası kohezyon kuvvetlerinin etkisi ile artacaktır. Şekil 3.6'da film kalınlığına bağlı çekme direnç kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 3.6 Film kalınlığına bağlı bağlayıcı davranış eğrisi (Ağar, 1975)

Yukarıda ana hatları ile açıklanan asfalt film kalınlığı ve davranışları tezin konusu kapsamında olmasına rağmen film kalınlığının bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkisini yalnızca bağlayıcı bakış açısından değerlendirmek doğru olmaz. Çünkü yalnızca bitümlü bağlayıcıyı incelemek, yoldan beklenecek performans düzeyinin belirlenmesinde yeterli olmamaktadır. Çalışmada, film kalınlığının yaşlanma ve suya bağlı bozulmalara olan etkisi, bitümlü sıcak karışım özellikleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Konu ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümlerde verilecektir.



4. YAŞLANMA

Bitümlü bağlayıcının asfalt kaplama performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır.

Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir.

Yaşlanma, kaplamanın yapımı sırasında bağlayıcının hafif bileşenlerinin buharlaşması ve oksidasyonudur. Oksidasyon, yolun servis ömrü boyunca da devam etmektedir. Her iki durum da, bağlayıcının viskozitesinin artmasına, penetrasyon değerinin düşmesine ve karışımın sertleşmesine neden olmaktadır. Bu durum karışımın kırılgenliğini ve çatlaklara karşı duyarlılığını arttırmaktadır (Vallegra, 1981).

Yapılan ayrıntılı çalışmalar, yaşlanmanın iki aşamada oluştuğunu göstermektedir.

1-Kısa Dönem Yaşlanma

2-Uzun Dönem Yaşlanma

Kısa dönem yaşlanma, sıcak karışımın depolanma, plente taşınma, plente karıştırılma, şantiyeye taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri sırasında; uzun dönem yaşlanma ise, yolun servis ömrü boyunca oluşmaktadır.

Bu bölümde, yaşlanma üzerinde etkili olan faktörler, yaşlanmanın kimyasal analizi, kaplama yapımının değişik aşamalarında bitümlü bağlayıcı yaşlanması, bitümlü bağlayıcının ve karışımların yaşlandırılmasına ilişkin yöntemler, çalışmada kullanılan yaşlandırma ve değerlendirme yöntemleri ve bitümlü sıcak karışımların yaşlanmasında etkili karışım parametreleri incelenecektir.

4.1 Yaşlanmayı Etkileyen Faktörler

Bitümlü bağlayıcının zamanla sertleşmesine ve giderek özelliklerini kaybetmesinde etkili faktörler ilk kez Dow (1903) tarafından ortaya atılmıştır. Yapılan çalışmada,

sıcak karışımdan geri kazanılan bitümlü bağlayıcının ağırlık ve penetrasyon özellikleri incelenmiştir.

Traxler (1961), bağlayıcının yaşlanma özelliklerine etkileyen faktörleri dört sınıfta incelemiştir. Bunlar:

- Oksidasyon,
- Buharlaşma veya uçucu madde kaybı,
- Polimerizasyon (aktif ışığa bağlı olarak),
- Yoğunlaşma polimerizasyonu (ısıya bağlı olarak).

Traxler, yukarıda sayılan bütün etkilerin zaman içinde değiştiğini belirtmiştir.

Traxler (1963), yaptığı diğer bir çalışmada, bağlayıcının yaşlanma özelliklerini etkileyen faktörleri 15'e çıkartmıştır (Tablo 4.1). Traxler'in yayını bu etkileri destekleyen deneysel çalışmalara dayanmaktadır.

Daha sonraları Petersen (1984), karışımların yaşlanmasına ilişkin faktörleri üç temel sınıfta incelemiştir.

- Buharlaşma ya da absorpsiyon sonucu asfalt içindeki yağ parçacıklarının azalması,
- Atmosferdeki oksijen ile reaksiyona giren (oksidasyon) bağlayıcı kompozisyonundaki değişme
- Moleküler yapının tiksotropik etkileri.

Yaşlanma ve etkilerini inceleyen araştırmacılar, Petersen tarafından verilen faktörlere bağlı kalarak çalışmalar yapmışlardır.

Genel olarak, bağlayıcının zamanla sertleşmesine yol açan faktörler aşağıda açıklanmıştır (Uluçaylı, 1998).

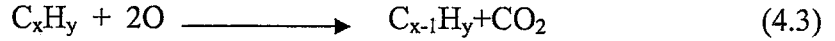
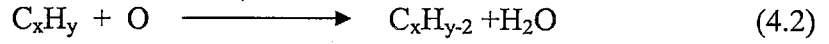
4.1.1 Oksidasyon

Oksidasyon, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasında rol oynayan önemli faktörlerden biridir. Organik moleküllerden oluşması nedeni ile bitümlü bağlayıcıların oksidasyonu, bağlayıcının hidrokarbon bileşenlerinin havanın oksijeni ile birleşmesi şeklinde tanımlanmaktadır (The Shell Bitumen Handbook, 1990). Bu reaksiyonda bitüm, hidrojen ve karbonun bir kısmını kaybetmektedir.

Tablo 4.1 Bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını etkileyen faktörler (Traxler, 1963)

Etkiler	Etkilerin Bağlı Olduğu Nedenler				Etkilerin Meydana Geldiği Yer		Önlemler
	Zaman	Isı	Oksijen	Güneş ışığı	Yüzeyde	Kütlede	
1.Oksidasyon (ışıksız ortam)	X	X	X		X	-	1-İnert atmosfer 2-Radikal önleyiciler
2.Fotooksidasyon (direkt ışık)	X	X	X	X	X	-	1-Işıktan koruma 2-İnert atmosfer 3-Radikal önleyiciler
3.Buharlaşma	X	X	-	-	X	X	1-Sıcaktan koruma
4.Fotooksidasyon (yansıyan ışık)	X	X	X	X	X	-	1-Işıktan koruma 2-İnert atmosfer 3-Radikal önleyiciler
5 Fotokimyasal (direkt ışık)	X	X	-	X	X	X	1-Işıktan koruma 2-Katkı kullanımı
6.Fotokimyasal (yansıyan ışık)	X	X	-	X	X	X	1-Işıktan koruma 2-Katkı kullanımı
7.Polimerizasyon	X	X	-	-	X	X	1-Radikal önleyiciler
8.Tiksotropi	X		-	-	X	-	1-Dağılan katkı eklenmesi 2-Bağlayıcının kaynağının değiştirilmesi
9.Sinerisis	X	X	-	-	X	-	1-Bağlayıcının parafin içeriğinin azaltılması
10.Nükleer enerjiye bağlı değişim	X	X	-	-	X	X	----- -----
11.Suyun etkisi	X	X	X	X	X	-	1-Bağlayıcı kaynağının değiştirilmesi
12.Katı absorpsiyonu	X	X	-	-	X	X	1-Bağlayıcının dağılmasını sağlanması
13.Katı yüzeyinde bileşenlerin absorpsiyonu	X	X	-	-	X	-	----- -----
14.Kimyasal reaksiyonlar veya ara fazda katalitik etkiler	X	X	-	-	X	X	----- -----
15.Mikrobiyolojik bozulma	X	X	X	-	X	X	1-Bakteriostatik fungistatik katkı eklenmesi

Bitümün kimyasal formülü C_xH_y şeklinde ifade edilirse, bu reaksiyonlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Hunter, 1994).



Bu reaksiyonların oluşması yukarıdan aşağıya doğru daha fazla aktivasyon enerjisini (ısı ve ışık) gerektirmektedir.

Birinci tip reaksiyon hava ile temas eden yüzeyde meydana gelmekte ve bir kabuk oluşmaktadır. Bu kabuk hasar görmezse, içeriye oksijen girişini engellemekte ve oksidasyon olayı yavaşlamaktadır. Kabuk aynı zamanda bağlayıcıdaki uçucu yağların buharlaşmasına da engel olduğundan sertleşme gecikmektedir. Bu yüzden agrega daneleri üzerindeki bağlayıcı filminin mümkün olduğu kadar kalın olması istenir. Ancak fazla bitümün kuma ve stabilite düşüşüne neden olmaması için film kalınlığının optimum değerinin saptanması gerekmektedir. (Agrega danelerini saran bağlayıcı film kalınlığının oksidasyon üzerindeki etkisi deneysel çalışmalar kısmında yer almaktadır).

Rafinerilerde oksidasyon işlemi “air blown asphalt” elde etmek için isteyerek yapılmaktadır. Bu işlem, özel bir tankta kalıntı asfalt içine sıcak hava üflenerek kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmekte ve ikinci tip reaksiyon meydana gelmektedir. Bu reaksiyon sonucu bağlayıcı aşağıda sıralanan değişime uğramaktadır:

- Penetrasyon değeri düşmektedir,
- Yumuşama noktası yükselmektedir,
- Sıcaklık değişimine karşı duyarlılığı (temperature susceptibility) azalmaktadır (Uluçaylı, 1998).

Bitümlü bağlayıcının agrega ile karıştırılması, sıkıştırılması ve servis ömür boyunca yaşlanma özellikleri ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

4.1.2 Buharlaşma veya Uçucu Madde Kaybı

Bitümlü bağlayıcı bünyesinde az da olsa bulunan uçucu maddeler, zamanla ve/veya sıcaklık nedeni ile uçarak bağlayıcının sertleşmesine neden olmaktadır. Penetrasyon cinsi bitümler göreceli olarak daha az uçucu olmakta ve dolayısıyla uçucu bileşen kaybından kaynaklanan sertleşme miktarı daha az olmaktadır.

4.1.3. Sızıntı Sertleşmesi

Sızıntı sertleşmesi, bitümden mineral agrega içersine yağlı bileşenlerin sızmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür sertleşme, hem bitümün sızıntı eğiliminin hem de agreganın porozitesinin bir fonksiyonudur.

4.1.4 Tiksotropi

Tiksotropi, bitümlü bağlayıcılarda çok sık karşılaşılan bir olaydır. Bitümlü bir bağlayıcı, düşük sıcaklıkta kendi haline bırakılınca zamanla artan bir rijitlik kazanmaktadır. Bu rijitliğin sebebi bağlayıcının uçucu bileşenlerinin buharlaşması veya sıcaklığın değişmesi olmayıp, bağlayıcının kolloidal yapısıdır. Kolloidal yapının etkisi ile bağlayıcı belirli bir durgunluk süresinden sonra, soğukta, sünger şeklini andıran, üç ekseninde gerilmiş ağ biçiminde ancak elektronik mikroskopta görülebilecek bir yapı kazanmaktadır. Bu yapı zamanla güçlenerek, bağlayıcıya, dış kuvvetler karşısında, elastik cisimlerininkine benzeyen bir rijitlik kazandırmaktadır. Fakat mekanik bir sarsıntı sonunda bu rijitlik kaybolmaktadır. Aynı rijitliği elde edebilmek için bağlayıcıyı belirli süre bekletmek gerekmektedir.

Sıcaklığın artışı da bağlayıcının tiksotropiye bağlı rijitliği üzerinde mekanik bir sarsıntıya eşdeğer etkiler doğurmaktadır. Çünkü sıcaklık artışı ile bağlayıcının misellerden oluşan rijitlik dokusu bozulmakta ve miseller birbirlerinden ayrılmaya başlamaktadır. Bunun sonunda bağlayıcı rijitliğini kaybetmektedir.

Özet olarak tiksotropi, kolloidal bir eriyin mekanik veya termik etkiler altında rijitliğini kaybetmesi ve diğer bütün fizik koşulların değişmemesi şartı ile belirli bir durgunluk süresi sonunda aynı rijitliği tekrar kazanması özelliğidir (Ağar, 1997).

4.1.5 Sinerisis

Asfaltın yapısında meydana gelen değişiklik yüzünden yağlı bir film tabakasının yüzeye çıkması olayıdır.

4.1.6 Polimerizasyon

Bağlayıcının hidrokarbon zincirinin zamanla değişime uğraması ve moleküllerin büyümesi olarak tanımlanmaktadır.

Yukarıda sayılan faktörlerin en önemlileri oksidasyon ve buharlaşmadır. Bu iki faktör bağlayıcının yapısındaki kimyasal değişiklik nedeni ile oluşmaktadır. Diğer faktörler ise sadece fiziksel nedenlere bağlıdır. Fiziksel yaşlanmaya maruz kalmış bağlayıcılar orijinal viskozite değerine kadar ısıtılacak olursa yaşlanma büyük ölçüde giderilmekte ancak oksidasyon sertleşmesi kesinlikle giderilememektedir.

4.2 Yaşlanmanın Kimyasal Analizi

Asfalt teknolojisinde, asfaltın kompozisyonu ve yapısı tam olarak anlaşılmış değildir. Bunun sebebi, diğer organik malzemelere kıyasla asfalt kimyasının çok karmaşık olmasıdır.

Bitümlü bağlayıcının kompozisyonuna bakıldığında, asfaltın, doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve polar aromatiklerden oluştuğu görülmektedir (Tuffour ve diğ., 1989). Tablo 4.2'de yaşlanmamış bağlayıcılara ait analiz sonuçları verilmektedir.

Tablo 4.2 Yaşlanmamış bağlayıcılara ilişkin bileşenler (Tuffour ve diğ., 1989)

Örnek	A	B	C	D	E
%Asfaltın	17.05	13.73	13.29	16.16	15.59.
%Doymuşlar	18.28	5.18	6.95	16.22	15.76
%Aromatikler	27.55	19.66	23.04	26.34	25.26
%Polar aromatikler	35.97	59.90	55.77	40.49	42.12

Yapılan çalışmalar, yaşlanma işlemi sırasında bağlayıcıda daha fazla asfaltın bileşenlerinin oluştuğu, doymuş bileşen yüzdelерinin değişmediğini göstermiştir. Ayrıca polar ve naftan aromatik yüzdelерinin de düştüğü ortaya çıkmıştır. Tablo 4.3'te asfalt kaplamadan alınan örnekler üzerinde yapılan analiz sonuçları verilmektedir.

Tablo 4.3 Asfalt kaplamadan geri kazanılmış bağlayıcı bileşenleri (Tuffour ve diğ., 1989)

Örnek	A	B	C	D	E
%Asfalten	37.56	36.37	33.36	33.02	36.86
%Doygunlar	14.93	14.80	14.87	16.69	14.09
%Aromatikler	14.43	17.26	14.87	15.44	16.50
%Polar aromatikler	33.26	31.19	36.48	34.44	31.44

Bağlayıcıda bulunan doymuş hidrokarbonların avantajı, oranları (%) arttırıldığında kimyasal değişimlere ve yaşlanma etkilerine daha dirençli hale gelmeleridir. Yaşlanma olayı sırasında aromatik bileşenlerin hangilerinin asfaltene dönüştüğü bilinmemesine karşın, asfalten içeriklerinin bağlayıcının viskozitelerini arttırdıkları belirlenmiştir (Petersen, 1993).

Konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalar, bağlayıcının tek bir bileşeni ile yaşlanma davranışının incelenmesinin doğru sonuçlar vermeyeceğini göstermiştir. Ishai (1987), yaşlanma davranışının “Gaestel İndeksi (IC)” ile daha iyi açıklanabileceğini ve bu indeks ile bağlayıcının reolojik özellikleri (penetrasyon, viskozite) arasında sıkı bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir. Gaestel İndeksi, hidrokarbonun asfalten ve doymuş bileşenlerinin toplamının, naften aromatik ve polar aromatik bileşenlerinin toplamına oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$IC = \frac{Asfalten + Doygunlar}{Naftenaromatikler + Polararomatikler} \quad (4.4)$$

Yapılan deneysel çalışmalar yaşlandırılmış bağlayıcıların Gaestel İndeksi değerlerinin, yaşlandırılmamış bağlayıcılara oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Yukarıda ana hatları ile açıklanan bitümlü bağlayıcının yaşlanmasının incelenmesi, kaplama performansının tahmini bakımından yeterli olmamaktadır. Çünkü yaşlanmayı hem bağlayıcı hem de karışım özellikleri etkilemektedir. Deneysel çalışmalar bölümünde yaşlanma olayı, bitümlü sıcak karışımlar gözönüne alınarak incelenmiştir.

4.3 Kaplama Yapımının Değişik Aşamalarında Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcı, rafineriden çıkışından yol üzerinde hizmete başlayıncaya kadar yapılan işlemlerde önemli derecede oksidasyona uğramaktadır. Bu durum bağlayıcının reolojik davranışını, performansını ve dayanıklılığını büyük ölçüde etkilemektedir.

Depolanma sırasında bitümlü bağlayıcı büyük bir kütle halindedir ve günler, haftalar boyunca yüksek sıcaklığını koruyabilmektedir. Agregaya ile karıştırma, taşıma ve yolun yapımı sırasında bağlayıcı, kısa bir süre için yüksek sıcaklıkta ve ince bir film tabakası halinde, servis ömrü içinde ise de uzun bir süre orta veya düşük sıcaklıkta ve ince bir film tabakası halindedir (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

Bitümlü bağlayıcının bu dört durum içinde gösterdiği özellikler aşağıda sıralanmıştır.

4.3.1 Depolanma Sırasındaki Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması

Bağlayıcı tank içinde yüksek sıcaklıkta ve büyük bir kütle halinde iken çok az bir oksidasyon oluşmaktadır. Bu durum oksijene maruz kalan asfalt yüzeyinin tüm kütleyle oranla çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bağlayıcı tank üstündeki taşıyıcı borudan geçip, bağlayıcı yüzeyine belli bir mesafeden düştüğünde önemli miktarda oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun sebebi, bir borudan tanka düşen asfaltın yüzey alanının daha geniş olması sebebiyle oksijenin asfalt ile kolayca reaksiyona girebilmesidir (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

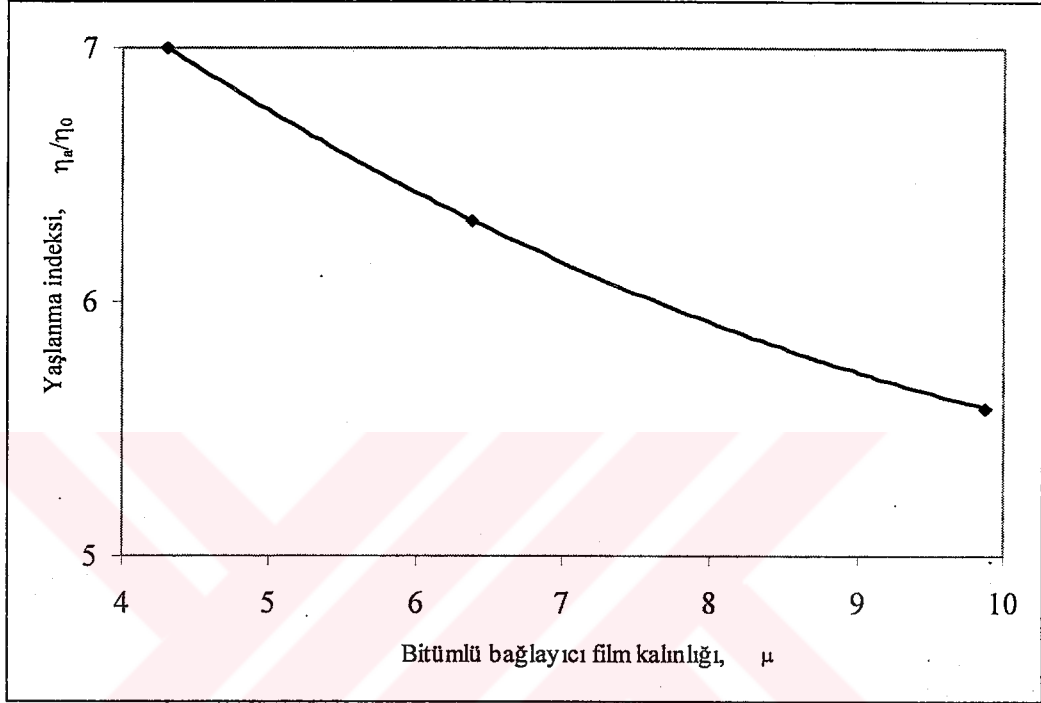
4.3.2 Agregaya ile Karıştırma Sırasındaki Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması

Karıştırma işlemi sırasında tüm agregaya daneleri ve filler, kalınlığı 5 ile 15µ arasında değişen bağlayıcı filmi ile kaplanmaktadır. Bu durumda, karıştırıcı (mikser) içindeki karışım, oksidasyon ve buharlaşmadan kaynaklanan yaşlanmaya oldukça duyarlıdır. Karışımlar için uygun bir bağlayıcı seçiminde karıştırma sırasındaki yaşlanma gözönüne alınmaktadır.

Agregaya ile karıştırma işlemi sırasındaki yaşlanma, sıcaklık, karıştırma süresi, bağlayıcı yüzdesi ve film kalınlığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Karıştırma süresince yaşlanmanın getireceği zararların en aza indirilmesi tüm bu faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Sıcaklık kontrolü ile bitüm miktarı özellikle kritik önem taşımaktadır (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

Şekil 4.1’de film kalınlığına bağılı olarak yaşılanma indeksi değeri verilmektedir. Yaşılanma indeksi, yaşılanmış bağlayıcının viskozitesinin (η_a), orijinal bağlayıcının viskozitesine oranıdır (η_o).

$$\text{Yaşılanma İndeksi} = \frac{\eta_a}{\eta_o} \quad (4.5)$$



Şekil 4.1 Yaşılanma indeksi üzerinde bitümlü bağlayıcı film kalınlığının etkisi (Griffin ve diğ., 1955)

Şekilden de görüleceği gibi agrega danelerini saran film kalınlığı azaldıkça yaşılanma indeksi artmaktadır (Griffin ve diğ., 1955).

Kullanılan mikser tipi de karıştırma sırasındaki yaşılanmayı etkileyen faktörlerden biridir. Çalışmalar, yaşılanmanın tambur tipi mikserlerde hazırlanan karışımlarda, beç tipi mikserlerde hazırlanan karışımlara kıyasla daha az olduğunu göstermiştir (Haas, 1974). Bu durum, tambur tipi mikserlerde karıştırma işleminin daha az sürede yapılmasının bir sonucudur. Ancak, farklı tasarımlara sahip tambur tipi mikserler, bunları kullanan plentur arasında farklı sertleşme meydana gelmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu durum gözönüne alınarak Shell Bitüm İngiltere tarafından gerçekleştirilen bir araştırma, eşit karışım sıcaklıkları altında, tambur tipi mikserde hazırlanan karışımın, beç tipi mikserde hazırlanan karışıma oranla penetrasyondaki toplam azalmanın %5 ile %15 daha düşük, yumuşama noktasındaki artışın da 4°C daha az olduğunu ortaya koymuştur (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

4.3.3 Sıcak Karışımın Depolanması, Taşınması ve Serilmesi Sırasındaki

Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması

Karışımın depolanması sırasında oluşan yaşlanma önceki bölümlerde de sözedildiği gibi karışımın sıcaklığına, film kalınlığına ve oksijene maruz kalma süresine bağlıdır. Bir karışım depolama silosuna boşaltıldığında içerisine hava girmekte ve bu havanın bir miktarı malzeme içersindeki boşluklarda kalmaktadır. Depolama süresince, hava içersindeki oksijenin bir kısmı bitüm ile reaksiyona girmektedir. Ancak siloya ilave oksijen girmez ise oksitlenme bir süre sonra durur.

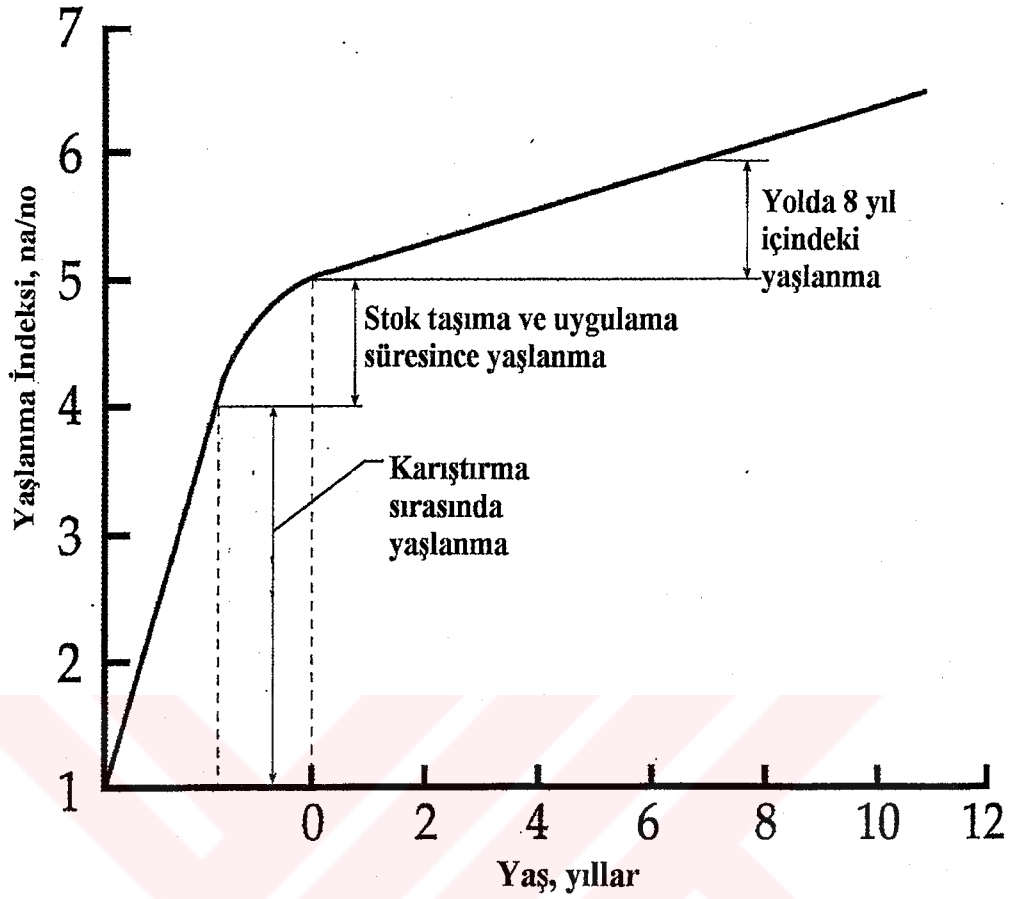
Karışımların depolanması için kullanılan siloların yükleme ve boşaltma kapaklarının hava geçirmez olması gereklidir. Aksi halde, silo bir baca gibi çalışarak içinden sürekli hava geçirir, bunun sonucunda da malzeme oksitlenir ve soğur.

Ayrıca, silo mümkün olduğu kadar tavanda serbest hava bulunmayacak şekilde doldurulmalıdır. Aksi halde, silonun tavanında kalan hava, karışımın yüzeyinde reaksiyona sebep olacaktır. Bu reaksiyon sonucu karbondioksit (CO₂) açığa çıkacak ve karbondioksit havadan daha ağır olduğundan karışımın üst bölümünde bir örtü görevi görüp oksidasyon hızını azaltacaktır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen araştırmalar, silodaki oksitlenmenin giren hava ile sınırlandırılması durumunda taşıma ve serme sırasında ek oksitlenmenin gerçekleşmeyeceğini ortaya koymuştur (Brock, 1986). Bu durumun sebebi, araca yükleme sırasında, karışıma belirgin derecede temiz hava girişi olmamasıdır. Dolayısıyla, oksitlenme için çok az miktarda ilave oksijen girişi söz konusu olacaktır. Yapılan incelemeler karışımın mikserden taşıma aracına doğrudan dökülmesi durumunda, taşıma süresince oluşacak sertleşme miktarının, silo depolanması sırasında oluşan miktara benzer olduğunu göstermiştir (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

4.3.4 Servis Ömrü Boyunca Bitümlü Bağlayıcı Yaşlanması

Şekil 4.2'de bitümlü bağlayıcının yıllara bağlı yaşlanma indeksi değerleri görülmektedir. Kısa dönem yaşlanma süresince oksidasyonun yaklaşık %70'inin meydana geldiği; uzun dönem yaşlanma süresince de oksidasyonun yavaşlayarak 8 yılda yalnızca %30 civarında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.2 Agrega ile karıştırmadan itibaren göreceli viskozite artışı (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

Şekilden de görüldüğü gibi hızlı yaşlanma, karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasında oluşmakta, bu süreç yolda düşük sıcaklıklarda yavaşlamaktadır.

Servis ömrü boyunca meydana gelen yaşlanma, karışımın sıkıştırılma derecesi (hava boşluk oranı), geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı film kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörler ve konu ile ilgili yapılan çalışmalar ilerleyen bölümlerde ayrı bir konu başlığı altında incelenecektir.

4.4 Bitümlü Bağlayıcıyı ve Bitümlü Sıcak Karışımları Yaşlandırma Yöntemleri

Bu bölümde bitümlü bağlayıcıların ve bitümlü sıcak karışımların yaşlandırılma yöntemleri üç başlık altında incelenecek ve bu yöntemleri kullanan araştırmacıların çalışmaları bir tabloda özetlenecektir.

4.4.1 Bitümlü Bağlayıcıyı Yaşlandırma Yöntemleri

Bu bölümde bitümlü bağlayıcıları yaşlandırma yöntemleri genişletilmiş sıcaklık, oksidasyon, mor ve kızıl ötesi ışık yöntemleri olmak üzere üç ana başlık altında incelenecektir.

4.4.1.1 Genişletilmiş Sıcaklık Yöntemleri

- İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT)

Lewis ve Welborn (1940), bağlayıcıların buharlaşma ve sertleşme özelliklerinin saptanması için ince film halinde ısıtma deney aletini geliştirmişlerdir. Bu deneyde yaklaşık 3 mm kalınlığında bağlayıcı, 140 mm çapındaki düz kaplarda, 163°C'de 5 saat süre ile ısıtılmış ve daha sonra bağlayıcı üzerine penetrasyon, düktilite ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Bu test yöntemi AASHTO'nun 1959 ve ASTM'nin 1969 standartlarında yer almaktadır.

Welborn (1979), bu deney yönteminin bağlayıcının plentte karışım sırasındaki davranışını temsil ettiğini belirtmektedir. Birçok araştırmacı TFOT'de küçük değişiklikler yapmışlardır. Edler ve diğ. (1985), film kalınlığını 100 mikrona ve deney süresini 24 saate çıkarmışlardır.

- Shell Mikrofilm Testi

Griffin ve diğ. (1955), cam kaplar kullanarak 5 mikron kalınlığındaki bağlayıcıyı 2 saat süre ile yaşlandırmışlar ve bağlayıcının yaşlanma indeksini saptamışlardır.

Hveem ve diğ. (1963), Shell Mikrofilm deneyini bağlayıcı film kalınlığını 20 mikrona, süreyi 24 saate çıkartarak geliştirmişler, yol üzerinde meydana gelen yaşlanma ile laboratuarda yaşlandırılan numuneler arasında ilişki kurmuşlardır.

- Döner İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)

Bu deney yöntemi, California Yollar Departmanı tarafından geliştirilmiştir. Deneyde ince film halinde ısıtma deney yönteminde kullanılan 1/8 inç (3 mm)'den ince bağlayıcı filmleri yaşlandırılmaktadır. Hveem ve diğ. (1963), bu yöntemi deneylerinde kullanmışlardır.

Deney, 35 gr. numunenin 163°C'lik döner bir fırın içinde 75 dakika süre ile bekletilmesini kapsamaktadır. Bu durum yaklaşık 1.25 mm (1250 mikron)'lik bağlayıcı filminin cam kap içinde akmasına neden olmaktadır. Döner ince film etüv

deneyi, ASTM 'nin 1970 standardında yer almaktadır. Birçok araştırmacı, döner ince film etüv deneyinde küçük değişiklikler yapmışlardır. Edler ve diğ. (1985) deneylerinde yaşlandırma süresini 8 saate çıkarmışlardır.

- Döner Mikrofilm Etüvü Deneyi (RMFO)

Schmidt ve Santucci (1969), RTFOT'i geliştirmişler ve bağlayıcıyı benzende eriterek cam kap çerperinin bağlayıcı ile kaplanmasını sağlamışlardır. Daha sonra, benzeni buharlaştırmışlar ve 20 mikron kalınlığında bir bağlayıcı filmi elde etmişlerdir. Elde edilen bağlayıcı 99°C'lik döner fırında 24 saat bekletilmiştir. Bu deneyin dezavantajı, her bir cam şişeden çok az bir numune elde edilmesidir (0.5 gr).

- Eğik Etüv Sağlamlık Deneyi (TODT)

Kemp ve Predoehl (1981), etüvü 1.06° arkaya doğru yatırarak eğik etüv deney yöntemini geliştirmişlerdir. Yatırma işlemi, döner şişelerden bağlayıcının çıkmasını önlemiştir. Deney, 113°C'de 168 saat sürmüş ve deney kalıntısı üzerine penetrasyon, viskozite ve duktilite deneyleri uygulanmıştır.

Hattie (1983), benzer bir deneyi 115°C'de ve 100 saat uygulamıştır.

Santucci ve diğ. (1981), her iki araştırmacının uyguladıkları deneyleri değerlendirmiş ve Kemp ve Predoehl tarafından geliştirilen deneyin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

- Hızlandırılmış İnce Film Halinde Yaşlanma Deneyi (TFAAT)

Petersen (1989), RMFO'yu geliştirerek, 4 gr. bağlayıcı numunesi elde etmiştir. Deney 113°C de ve 72 saat sürmüştür.

Petersen, ince film halinde ısıtma deneyi ve döner ince film halinde ısıtma deneyleri sırasında kullanılan birçok bağlayıcının servis ömrü boyunca yollarda kullanılan bağlayıcılara oranla daha çok uçucu madde kaybına uğradıklarını saptamıştır. Ayrıca, adı geçen deneylerde, oksidasyona bağlı yaşlanma düzeyinin yol üzerinde meydana gelen yaşlanmaya oranla daha düşük olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle TFAAT, buharlaşma ve oksidasyona bağlı yaşlanmayı en iyi şekilde temsil etmesi bakımından geliştirilmiştir.

Petersen (1989), TFAAT ve TFOT' ten elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indekslerini Tablo 4.4'te karşılaştırmıştır.

Tablo 4.4 BOSCAN AC-10 bağlayıcının değişik yöntemler kullanılarak yaşlanma düzeyleri (Petersen, 1989)

Yaşlandırma Yöntemi	Yaşlanma İndeksi	Log Yaşlanma İndeksi
Orijinal (yaşlanmamış)	1.0	0
TFOT	3.0	0.48
TFAAT	214.0	2.33

Yukarıdaki tablo, hızlandırılmış ince film halinde yaşlanma deneyinin, ince film halinde ısıtma deneyine oranla daha ağır koşullara sahip olduğunu göstermektedir.

Petersen (1989), çalışmalarından elde ettiği verilere dayanarak, TFAAT'nın yolda meydana gelen yaşlanma ile aynı düzeyde yaşlanmaya neden olduğu sonucuna varmıştır.

4.4.1.2 Oksidasyon Yöntemleri

- Hava Üfleme Yöntemi

Nicholson (1937), bağlayıcıları 15 dakika süre ile 229°C'de ve 0.0091 m³/dakika hızda hava üfleme yöntemi ile yaşlandırmıştır. Deney sonucundan elde edilen bitümlü bağlayıcıların penetrasyon ve viskozite değerleri, orijinal bağlayıcının penetrasyon ve viskozite değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

- Basınçlı Oksidasyon

Lee (1968), yaşlanma olayının iki aşamada incelenmesi gerektiğini belirtmiştir:

-Karıştırma sırasında yaşlanma,

-Servis ömrü boyunca yaşlanma.

Lee (1968), birinci aşama için, ince film halinde ısıtma deneyini; ikinci aşama için basınçlı oksidasyon deneyini uygulamıştır.

İngiltere Yol Araştırma Laboratuvarı (The British Road Research Laboratory-TRRL) yol katranları ile birlikte kullanılmak üzere bir deney aleti geliştirmişler ve deneysel çalışmalarına, yaşlanmanın etkilerini değerlendirmek için kırılma noktası deneyini eklemişlerdir (HMSO, 1962).

Iowa Sağlık Deneyi 1973 yılında aynı araştırmacı tarafından geliştirilen bir yöntemdir (Lee, 1973). Lee, deneyin aşamalarını aşağıdaki şekilde sıralamıştır:

-Orijinal bağlayıcı üzerine ince film halinde ısıtma deneyi,

-Kalıntı üzerine basınçlı oksidasyon deneyi (65°C'de, 300 psi basınç altında ve yaklaşık 1000 saat),

-Bağlayıcının kimyasal ve fiziksel özelliklerinin orijinal bağlayıcıya göre değerlendirilmesi.

Lee (1973) bu deney için 450 psi basınca dayanıklı, 190 mm (7.5 inç) çap ve yüksekliğinde bir oksidasyon kabı kullanmıştır.

Lee, laboratuvar ve yol üzerinde yaptığı çalışmalarda, Iowa Sağlamlık Deneyi ile 46 saat yaşlandırma miktarının; yolun 60 aylık yaşlanma miktarına benzer olduğu sonucunu elde etmiştir.

Edler ve diğ. (1985), yaşlanmayı iki aşamada incelemişlerdir. RTFOT ile 8 saat süre ile yaşlandırılan bağlayıcıyı üzerine 96 saat süre ile 65°C'de, 300 psi basınç altında basınçlı oksidasyon deneyi uygulamışlardır. Bağlayıcının bu işlemler sırasındaki yaşlanma düzeyini kayan plaka viskometre aleti kullanarak saptamışlardır. Ayrıca jel nüfuz kromatografisi (gel permeation chromatography) ile orijinal ve yaşlanmış bağlayıcıların moleküler yapı değişimlerini incelemişlerdir.

4.4.1.3 Morötesi ve Kızıl Ötesi Işık Yöntemleri

Traxler (1963), aktinik ışıkların bağlayıcı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Aktinik ışıklar, çeşitli maddeler ile kimyasal reaksiyonlar meydana getirmektedir. Çalışmalarından elde ettiği veriler, ince film halinde (3μ) olan bağlayıcılar üzerinde, morötesi ve kızılötesi ışıkların önemli etkileri olduğunu; daha kalın filmlerde ise bu etkilerin azaldığını göstermiştir.

Edler ve diğ. (1985) 0.004 inç (100μ) kalınlığında bağlayıcı filmini yaşlandırmak için iklimlendirme aleti kullanmışlardır. Deney, 65°C'de 102 dakika, ardından 18 dakika morötesi ve 300 psi su basıncı uygulamalarını içermektedir. Numuneler, toplam 32.5 saat, 73.5 saat, 7 gün ve 14 gün süre ile yaşlandırılmışlardır.

4.4.2 Bitümlü Sıcak Karışımları Yaşlandırma Yöntemleri

Karışımlar üzerinden bağlayıcının geri kazanılması işleminin geliştirilmesinden sonra araştırmacılar, yaşlanmanın karışımlar üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak

için bağlayıcının geri kazanılması yöntemi kullanmışlardır. Karışımlar üzerinde araştırmacıların yaptığı çalışmalar aşağıda verilmektedir.

4.4.2.1 Geliştirilmiş Sıcaklık Yöntemleri

Pauls ve Welborn (1952), 2 inç (50.4 mm) boyutundaki silindirik Ottawa kum karışımlarını 163°C’de farklı sürelerde etüvde yaşlandırmışlar ve karışımların basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Ayrıca karışımlardan geri kazanılan bağlayıcıların kıvamlarını saptamışlardır. Yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

-Bitümlü bağlayıcıların yaşlanma özellikleri, laboratuarda yaşlandırılan numuneler üzerine basınç dayanımı deneyi ve geri kazanılan bağlayıcı üzerine yapılan TFOT ile saptanabilmektedir.

-TFOT basit bir deney olduğu için, yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının yaşlanma özellikleri bu deney ile gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Plancher ve diğ. (1976), 25*40 mm boyutlarında karışımları etüvde yaşlandırarak, kirecin, bağlayıcının oksidasyona bağlı yaşlanma özelliklerini üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Uygulanan deneyler, kireç katkılı karışımların esneklik modülü değerlerinin, katkısız karışımlara kıyasla daha az değiştiğini göstermiştir.

Hugo ve Kennedy (1985), karışımları 100°C’lik etüvde yaşlandırmışlardır. Bu işlem, 4 ve 7 gün, kuru ve %80 nem oranına sahip atmosferde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlemlerden sonra numunelerden 4 inç (100 mm)’lik karotlar alınmıştır. Karotlardan geri kazanılan bağlayıcı üzerine kıvam deneyleri uygulanmıştır.

Von Quintas ve diğ. (1988), kısa dönem yaşlanmayı temsil etmek için hava sirkülasyonlu etüvler (forced draft oven) kullanmışlardır. Sıkıştırılmamış karışımlar 8, 16, 24 ve 36 saat 135°C’de yaşlandırıldıktan sonra karışımlardan geri kazanılan bağlayıcı üzerine viskozite ve penetrasyon deneyleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar orijinal bağlayıcının viskozite ve penetrasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Von Quintas ve diğ. (1988), ayrıca karışımların uzun dönem yaşlanma özelliklerine ilişkin araştırmalar yapmışlardır. Hava sirkülasyonlu etüv kullanılarak uygulanmış deney yöntemi aşağıda özetlenmiştir.

1-Sıkıştırılmış 6 adet deney numunesi 60°C’lik etüvde iki gün bekletildikten sonra numunelerden iki adeti dışarı çıkartılmıştır.

2-Etüv sıcaklığı 107 C'ye yükseltilerek geri kalan üç numune be  gün süre ile ya landırılmı tır.

Ayrıca sıkı tırılmı  üç numune üzerine, 60 C'de, 100 psi basınç altında, be  ile on gün arasında basınçlı oksidasyon işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, etüvde ya landırılmı  numuneler üzerine uygulanan indirekt çekme gerilme değerlerinin; basınçlı oksidasyon uygulanan numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum etüv kullanılarak yaşlandırma deneyinin daha ağır koşullara sahip olduğunu göstermektedir.

Von Quintas ve diğ. (1988), çalışmalarının sonucunda basınçlı oksidasyona göre etüv kullanılarak yaşlandırma yöntemini önermiştir. Ayrıca, etüvde yaşlandırma yöntemi üzerinde daha fazla çalışılması gerektiğini ve en iyi yöntemin seçilmesi için sıcaklık değerlerinin çok iyi biçimde değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Son zamanlarda SHRP bünyesinde Chris A. Bell ve arkadaşları tarafından ya lanmaya ilişkin laboratuar ve arazi çalışmaları yapılmış, uygulanan deney yöntemleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir (Bell ve diğ., 1994a; 1994b; 1994c).

-Karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması sırasında meydana gelen kısa dönem ya lanma işlemi laboratuarda, sıkı tırılmamı  karışımın 135 C'lik hava sirkülasyonlu etüvde 4 saat süre ile bekletilmesi ile tam olarak temsil edilmektedir.

-Kısa dönem ya lanma işleminde, karışımın her saat karıştırılması, homojen bir ya lanma düzeyi elde etmek bakımından son derece önemlidir.

-Yolun servis ömrü boyunca oluşan uzun dönem ya lanma işlemi, kısa dönem ya landırılmı  karışımın sıkı tırıldıktan sonra 85 C'lik hava sirkülasyonlu etüvde 120 saat (5 gün) bekletilmesi ile temsil edilmektedir. Sıkı tırılmı  karışımın 100 C'lik etüvde 2 gün bekletilmesi de aynı etkiyi sağlamakta ancak numunenin yüksek sıcaklıklarda deforme olabileceği dikkate alındığında, d  uk sıcaklıkta çalışılması tercih edilmektedir.

-Oregon State Universitesi'nde karışımın etüvde uzun dönem ya landırılmasına ek olarak d  uk basınçlı oksidasyon deneyi ile çeşitli sıcaklıklarda ya landırılma yöntemi geliştirilmiştir. Bu deney, sıkı tırılmı  karışımlar üzerine 60 C ve 85 C'de

basınç uygulamalarını içermektedir. Fakat deney yönteminin tam olarak yaşlanmayı temsil edip etmediği konusunda henüz ayrıntılı bir çalışma yapılmamıştır.

-The California and Georgia Asphalt Aggregate Mixture Analysis Study (AAMAS) raporlarına dayanılarak, laboratuarda hazırlanan numuneler üzerine uygulanan esneklik modülü deneyi sonuçları yoldan alınan veriler ile karşılaştırıldığında, birkaç bölge haricinde uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

4.4.2.2 Oksidasyon Yöntemleri

Kim ve diğ. (1986), Oregon karışımlarını laboratuarda basınçlı oksidasyon ile yaşlandırmışlardır. Deneyde, numuneler 60°C'de 100 psi basınç altında 1, 2, 3 ve 5 gün boyunca yaşlandırılmıştır. Yaşlanmanın etkileri esneklik modülü (resilient modülü) ve yorulma dayanımı testleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca numunelerin modül oranları da (modül oranı; yaşlandırılmış numunelerin esneklik modül değerinin, yaşlandırılmamış numunelerin esneklik modül değerine oranıdır) yaşlanma süresine bağlı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, yaşlanma süresinin artışı ile modül oranının arttığını göstermiştir.

4.4.2.3 Morötesi ve Kızılötesi Işık Yöntemleri

Hveem ve diğ. (1963), Ottawa kumu kullanarak karışımlar hazırlamışlardır. Karışımlar yarı sıkıştırılmış halde test edilmiştir. Numuneler üzerine 60°C'de ısı ve 41°C'de hava akımı yaratacak kızılötesi ışık işlemi uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar yaklaşık 1000 saat süren bu işlemin yolun 5 yıllık yaşlanmasına eşit olduğunu göstermiştir.

Hugo ve Kennedy (1985), karışımlara 54 saat ve 14 gün olmak üzere iki ayrı süre içinde morötesi ışık uygulamışlardır. Yapılan işlemlerden sonra, karışımlardan geri kazanılan bağlayıcı üzerine viskozite deneyleri uygulanmıştır.

Tia ve diğ. (1988), morötesi ışık ile ve etüvde yaşlandırma yöntemlerini sıkıştırılmış numuneler üzerinde karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar her iki deney yönteminde de yaşlanma düzeyinin aynı olduğunu göstermiştir. Ayrıca morötesi ışık yöntemleri ile birlikte hava sirkülasyonlu etüv kullanılmasının yaşlanmayı daha iyi temsil ettiğini belirtmişlerdir.

Tablo 4.5'te bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışımlar üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalar özet halinde verilmiştir.

Tablo 4.5 Laboratuarda yaşlandırma ve değerlendirme yöntemleri (Bell, 1989)

Yıl	Araştırmacı	Yaşlandırma Yöntemi	Değerlendirme Yöntemi
1903	Dow	163°C'de 18, 24 saat bağlayıcı 149°C'de 30 dk. karışım yaşlandırılır.	Kalıntı üzerinde ağırlık ve penetrasyon değişimi. Geri kazanılan bağlayıcı üzerine penetrasyon
1937	Nicholson	Hava üfleme, 229°C, 15 dk.	Penetrasyon, düktilite
	Raschig ve Doyle	Hava üfleme, 204°C, 15 dk.	Penetrasyonda değişim
	Hubbard ve Gollomb	Ottawa kum karışımı, sıcaklık ve zaman değişken	Geri kazanılan bağlayıcı üzerinde penetrasyon
1939	Lang ve Thomas	Ottawa kum karışımı, yaşlandırma etüvü	Karışım özelliklerinde değişim
1940	Shattuck	163°C'de 30 dk. karışımın yaşlandırılması	Geri kazanılan bağlayıcı üzerine penetrasyon ve düktilite değişimi
	Lewis ve Welborn	İnce film halinde ısıtma-163°C, 5 saat, 1/8 inç (3,18 mm) film kalınlığı	Penetrasyon, düktilite ve ağırlık değişimi
1946	Lewis ve Halstead	İnce film halinde ısıtma-163°C, 5 saat, 1/8 inç (3,18 mm) film kalınlığı	Penetrasyon, düktilite ve ağırlık değişimi
1952	Pauls ve Welborn	Ottawa kum karışımı, yaşlandırma etüvü	Basınç dayanımı, geri kazanılan bağlayıcı üzerine penetrasyon
1955	Griffin, Miles ve Penther	Shell mikrofilm test-5 mikron film kalınlığı, 2 saat, 107°C	Yaşlanma indeksi, orijinal ve yaşlanmış bağlayıcı viskoziteleri
1957	Vallegra, Monismith ve Granthem	Morötesi ve kızılötesi ışık	Penetrasyon, Düktilite ve Yumuşama Noktası
	Brown, Smith ve Sparks	Bağlayıcının ani sertleştirilmesi	Bağlayıcı üzerinde Çekme Testi
1958	Heithaus ve Johnson	Yol testleri-mikrofilm testi	Mikrofilm yaşlanma indeksi
1961	Traxler	İnce film halinde ısıtma (TFOT) ve mikrofilm deneyi (15 mikron film, 2 saat, 107°C	25°C de mikroviskozite değeri ile karşılaştırma
	Halstead ve Zenewitz	İnce film halinde ısıtma (TFOT) ve mikrofilm deneyi (15 mikron film, 2 saat, 107°C	25°C de mikroviskozite değeri ile karşılaştırma
1963	Hveem, Zube ve Skog	Modifiye Shell Mikrofilm Testi-20 mikron, 1 gün, 99°C, döner ince film etüvü, ince film halinde ısıtma-50 dakika, 163°C	25°C de mikroviskozite, orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcı Her iki deneyden elde edilen bağlayıcı üzerine viskozite deneyi
1968	Lee	TFOT 163°C, ardından 24, 48, 96 ve 240 saat basınçlı oksidasyon	25°C'de viskozite, kayma indeksi, asfaltın içeriği
1969	Schmidt ve Santucci	Döner mikrofilm testi (RMFO) 20 mikron, 99°C	Kalıntı üzerine viskozite
1973	Lee	TFOT, 150°C'de 20 atm. basınçlı oksidasyon	Mikroviskozite, kırılma noktası, düktilite, asfaltın içeriği

Tablo 4.5 (Devam)

1976	Benson	TFOT, aktinik ışık,yol üzerinde koşullandırma	Penetrasyon, viskozite
	Planceher, Green ve Petersen	Döner ince film halinde ısıtma (RTFOT), RMFO, karışımın 150°C lik fırında 5 saat yaşlandırılması	Mikroviskozite, Asfalten içeriği, kimyasal analiz, esneklik modülü (resilient modulus)
1977	Kumar ve Goetz	Hava geçirgenliği 60°C 0,5 mm. su ile 1, 2, 4, 6, 10 gün	21±2°C'de sünme, tekrarlı yükleme sünme eğrisi eğiminin saptanması ile oksidasyona karşı duyarlılık Dayanıklılık İndeksi=X günde eğri eğimi/başlangıç eğimi
1981	Kemp ve Predoehl	Aktik ışık ile koşullandırma, RMOF, modifiye shell mikrofilm Testi, yol üzerinde koşullandırma	Penetrasyon ve duktilite 25°C, esneklik modülü,viskozite,kapiler viskozite
	Santucci, Goodrich ve Sundberg	113°C 168 saat ve 115°C 100 saat eğik fırın dayanıklılık testi	60ve 135°C'de viskozite; 4 ve 25°C'de penetrasyon; 25°C'de duktilite
1983	Mc Hattie	Geliştirilmiş RTFOT, 100saat 115°C	Penetrasyon, kinematik viskozite, esneklik modülü
1985	Edler ve diğ.	100 mikron bağlayıcı filmi, RTFOT 8 saat, basınçlı oksidasyon 65°C, 300psi, 96 saat; modifiye TFOT, 100 mikron film ve 24 saat	Kayan Plaka Viskometresi (1/0,05 sn), 45°C Oksidasyon Düzeyi-kızılötesi spektrum
	Hugo ve Kennedy	100°C yaşlandırma etüvü karışımların 54 saat ve 14 gün boyunca mor ötesi ışık ile koşullandırılması	Mikroviskozite, 25°C
1986	Kim ve diğ.	60°C, 100 psi 0 ve 5 gün basınçlı oksidasyon Yoldan geri kazanılmış bağlayıcı	Viskozite, penetrasyon,esneklik ve yorulma deneyleri
1988	Von Quintus ve diğ.	Kısa dönem yaşlandırma 135°C, 8, 16, 24 ve 36 saat Uzun dönem yaşlandırma 60°C ve 100 psi-basınçlı oksidasyon Etüvde yaşlandırma 60°C ve 2 gün, sonra 107°C 5 gün	Esneklik Modülü İndirekt Çekme Sünme
	Tia ve diğ.	Dalga sirkulasyonlu fırın (convection oven aging) Hava sirkulasyonlu fırın (forced draft oven) Mor ışık yaşlandırılması (1, 7, 28, 90 gün ve 60°C de) doğal yaşlanma 1, 2, 3 yıl	Esneklik Modülü, İndirekt Çekme, Geri kazanılmış bağlayıcı üzerine penetrasyon, viskozite, kızılötesi ışık spektrum analizi
1989	Petersen	Hızlandırılmış ince film yaşlanma deneyi	Buharlaşmaya bağlı ağırlık kaybı, viskozite, keton içeriği

4.5 Çalışmada Kullanılan Yaşlandırma ve Değerlendirme Yöntemleri

Bu bölümde bitümlü sıcak karışımların standartlara geçen yaşlandırılma yöntemleri ile birlikte, yaşlanmanın etkilerini değerlendirebilmek için uygulanan deneyler tanıtılacaktır.

4.5.1 Kısa ve Uzun Dönem Yaşlanma

Karışımın hazırlanması, depolanması, taşınması ve sıkıştırılması sırasında meydana gelen kısa dönem yaşlanma ile yolun servis ömrü boyunca meydana gelen uzun dönem yaşlanma, laboratuarda hava sirkülasyonlu etüv ile temsil edilmektedir.

Hava sirkülasyonlu etüv kullanılarak uygulanan yaşlandırma AASHTO'nun 1994 yılı standartlarına dahil edilmiştir.

Bu standartta kısa dönem yaşlanma; sıkıştırılmamış karışımın bir kaba m²'ye 21-22 kg gelecek şekilde yayılmasından sonra $135 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik fırında 4 saat ± 5 dakika bekletilmelerini içermektedir. Dört saat bekletilme süresi içinde karışım saat başı karıştırılarak uniform bir yaşlanma düzeyi elde edilmektedir (Saat başı karıştırma yaşlanmanın tam olarak temsil edilmesi bakımından son derece önemlidir).

Uzun dönem yaşlanma ise kısa dönem yaşlandırılmış karışımın, sıkıştırıldıktan sonra $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 120 ± 0.5 saat bekletilmesini içermektedir.

Yapılan çalışmalar, etüvle yaşlandırma yönteminin, yoldaki yaşlanmanın tam olarak temsil edilmesi, kolay kullanım olanağı, güvenilirlik ve uygulama maliyeti açısından uygun olduğunu göstermiştir (Bell, 1989).

6. ve 7. bölümde verilen deneysel çalışmalar AASHTO'nun yukarıda açıklanan yaşlandırma yöntemi esas alınarak yapılmıştır.

4.5.2 Değerlendirme Yöntemleri

Kısa ve uzun dönem yaşlanmanın karışımlar üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek için çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bir önceki bölümde de isimleri geçen araştırmacıların yaptıkları deneyler beş bölüm halinde gruplandırılabilir.

1-Esneklik Modülü (Resilient Modülü) Deneyi- M_R: (Kemp ve Prodehl, 1981), Kim ve diğ. (1986), Von Quintas ve diğ. (1988), Tia ve diğ. (1988))

2-Yorulma Deneyi (Kim ve diğ. (1986))

3-Sünme Deneyi (Kumar ve Goetz, 1977))

4-İndirekt Çekme Deneyi (Von Quintas ve diğ. (1988), Tia ve diğ. (1988))

5-Dinamik Modül (Dynamic Modulus)

Tablo 4.6’da araştırmacılar tarafından uygulanan deneyler, yoldan alınan veriler ile uyumluluğu, kullanım kolaylığı, maliyet, güvenilirlik, numune boyutu ve örselenme bakımından karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.6 Karışım Üzerine Uygulanan Deneylerin Değerlendirilmesi (Bell, 1989)

Ölçütler Deneyler	Esneklik Modülü	İndirekt Çekme Gerilmesi	Dinamik Modül	Sünme
Yoldan alınan veriler ile karşılaştırma	Veri yok	Veri yok	Veri yok	Veri yok
Uygulayabilme kolaylığı	Standarta geçmiş ve zor bir deney	Kolay bir deney	Esneklik Modülü deneyinden çok farklı değil	Standarta geçmiş ve kolay bir deney ancak çok zaman alıyor.
Kullanılan deney aleti maliyeti	Pahalı	Çok pahalı değil	Pahalı	Çok pahalı değil
Güvenilirlik	Kullanılan deney aletine göre değişmekte	Bilinmiyor	Kullanılan deney aletine göre değişmekte	Bilinmiyor
Numune Boyutu	Maksimum dane boyutuna göre değişken	4 inç (100 mm) çap; 2,5 inç (63.5 mm) yükseklik	4 inç (100 mm) çap; 2,5 inç (63.5 mm) yükseklik	Test türüne göre değişken
Örselenme	Yok	Var	Yok	Yok
Diğer faktörler	Yol üzerinde tekrarlı yükleri temsil etmektedir	—	Bağlayıcının etkisini tespit etmektedir.	Viskozite deneyi ile benzer sonuçlar vermektedir.

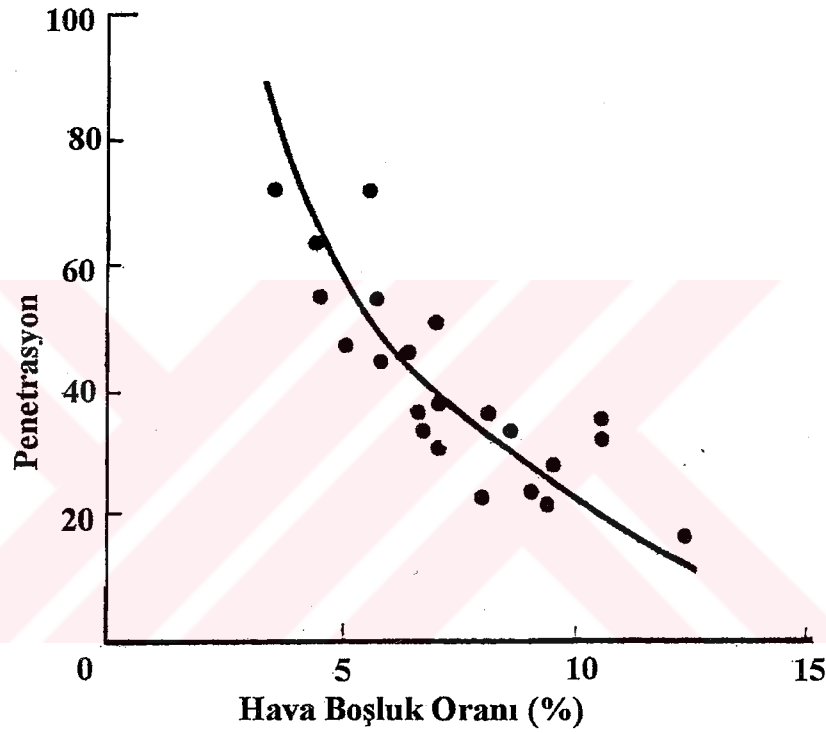
7. bölümde, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerine, yaşlanmanın etkilerini incelemek üzere esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi deneyleri uygulanmıştır.

4.6 Bitümlü Sıcak Karışımların Yaşlanmasında Etkili Karışım Parametreleri

Bitümlü sıcak karışımlarda yüksek hava boşluğu oranı, yüksek hava geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı filminin inceliği, kaplamanın dayanıklılığını azaltan yaşlanmanın en önemli nedenlerindendir.

Karışımın yaşlanmasına etki eden parametrelerinden biri olan hava boşluğu oranına ilişkin ilk çalışmalar, Heithaus ve Johnson (1958) tarafından yapılmıştır. Uygulanan deneyler, hava boşluğu oranının artışı ile yaşlanmanın arttığını göstermiştir.

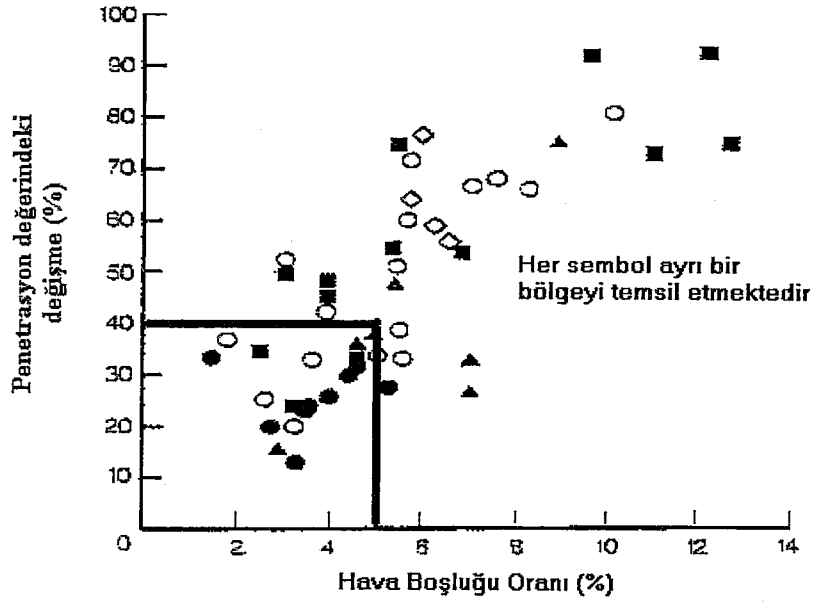
Lubbers (1985), çeşitli hava boşluk oranlarına sahip karışımlardan bağlayıcıyı geri kazanarak penetrasyon deneyleri uygulamıştır. Şekil 4.3'te %3 ile %12 hava boşluk oranına sahip karışımlardan geri kazanılan bağlayıcı penetrasyonu ile hava boşluk oranı arasındaki ilişki verilmiştir.



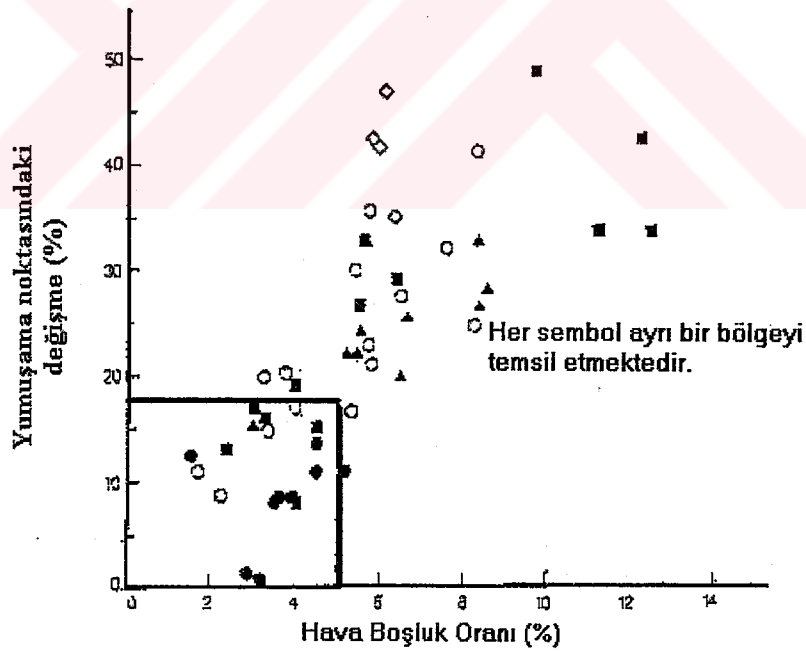
Şekil 4.3 Hava boşluk oranının yaşlanma üzerinde etkisi (Lubbers, 1985)

Yukarıdaki şekilde, hava boşluk yüzdesinin artışı ile penetrasyonun düştüğü başka bir deyişle, yaşlanma etkisinin arttığı gözlenmektedir.

İngiltere'de 1982 yılında hava boşluğu oranının karışımların yaşlanması üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere ayrıntılı bir çalışma yapılmıştır. Yol performansının iyi olduğu (boşluk yüzdesi yaklaşık %5) bölgelerde bağlayıcıda anormal bir yaşlanma gözlenmemiş, ancak boşluk yüzdesinin %12'yi aştığı çok kötü performansa sahip bölgelerde ise aşırı yaşlanma gözlenmiştir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). (The Shell Bitumen Handbook, 1990).



Şekil 4.4 Hava boşluğu yüzdesinin bitümlü bağlayıcının penetrasyon değerine etkisi
(The Shell Bitumen Handbook, 1990)



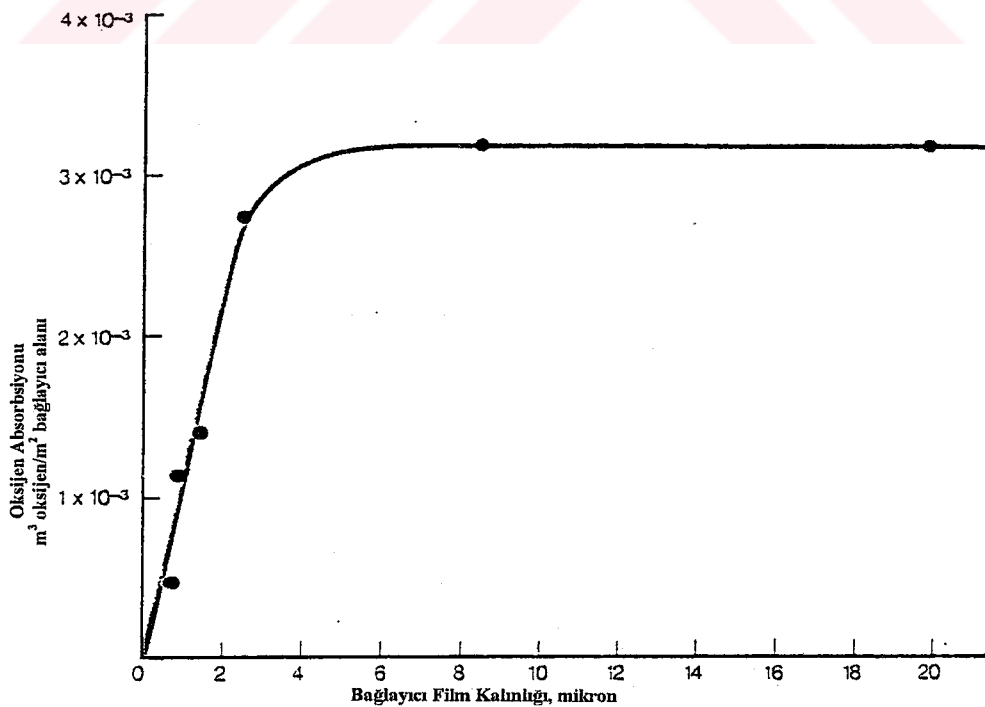
Şekil 4.5 Hava boşluğu yüzdesinin bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasına etkisi
(The Shell Bitumen Handbook, 1990)

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, sırasıyla, penetrasyon ve yumuşama noktasındaki yüzdesel değişimleri göstermektedir. Her iki durumda da sıkıştırmanın iyi olmadığı (yüksek

boşluk oranı) karışımlarda en büyük sertleşme görülmekte, iyi derecede sıkıştırmanın sağlandığı kaplamalarda ise (örneğin %5'in altında boşluk oranı) sertleşme miktarı genel olarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Hava geçirgenliğinin yaşlanma üzerinde etkisine ilişkin çalışmalara kaynaklarda sık rastlanmamaktadır. Kaplama içinden geçen havanın akış hızının yaşlanmayı arttırdığına, düşük geçirgenliğin bitümlü tabakayı, buna bağlı olarak da alt tabakaları koruduğuna inanılmaktadır. Konuya ilişkin tek çalışma Kumar ve Goetz (1977) tarafından yapılmıştır. Deneyde, sıkıştırılmış numuneler içinden 1, 2, 4, 6 ve 10 gün boyunca 60°C'de hava geçirilmiş ve numuneler üzerine sünme deneyi uygulanmıştır. Çalışmada, yaşlanmanın etkileri yalnızca sünme deneyi ile ölçülmüştür. Kumar ve Goetz yaptıkları çalışmalarda, yoğun gradasyonlu karışımlarda, karışımın yaşlanmasına ilişkin en gerçekçi değerlendirme ölçütünün hava geçirgenliği olduğu sonucuna varmışlardır.

Bağlayıcı film kalınlığı da bitümlü sıcak karışımların yaşlanmasında önemli rol oynamaktadır. Laboratuarda yapılan çalışmalarda, sıcak karışım içindeki bağlayıcı oksijen absorpsiyonunun 40-60°C sıcaklık değerleri arasında 4µ film kalınlığı ile sınırlı kaldığı, bu değerden sonra film kalınlığı artışı ile absorpsiyon miktarının değişmediği gözlenmiştir (Şekil 4.6) (Blokker ve Van Hoom, 1959).



Şekil 4.6 Bağlayıcı film kalınlığı ile oksijen absorpsiyonu arasındaki ilişki (Blokker ve Van Hoom, 1959)

Blokker ve Van Hoom çalışmalarında karışımın içindeki bağlayıcı film kalınlığının ortalama 5 μ ile 15 μ arasında değiştiğini saptamışlardır.

Campen ve diğ. (1959), yoğun gradasyonlu karışımlarda bağlayıcı film kalınlığı ile karışımın stabilite değerleri arasında ilişki kurmuşlardır. Kalın bağlayıcı filmi içeren karışımların daha esnek ve dayanıklı oldukları; buna karşılık ince bağlayıcı filmi içeren karışımların daha gevrek, kırılgan oldukları ve yolun servis ömrünü düşürdükleri yaptıkları çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre ortalama 6-8 μ film kalınlığı içeren sıcak karışımların ideal karışımlar olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, film kalınlığının, agreganın yüzey alanı artışı ile azaldığını ve aralarında doğrusal ilişki bulunmamakla birlikte gerekli bağlayıcı içeriğinin de yüzey alanı ile arttığını bulmuşlardır.

Goode ve Lufsey (1965), karışımların yaşlanma özellikleri ile gradasyona bağlı geçirgenlik, hava boşluk oranı ve film kalınlığı arasında ilişki kurmuşlardır. Karışımın bağlayıcının yaşlanma özelliğinin, film kalınlığı, boşluk oranı, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu tespit etmişlerdir. Adı geçen araştırmacıların elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

-Hava geçirgenliği, agrega gradasyonunun ve hava boşluk oranının bir fonksiyonudur. Yüksek hava boşluk oranına sahip karışımlarda gradasyonun etkisi, düşük hava boşluklu karışımlara kıyasla daha fazladır.

-Marshall karışım tasarımı kullanılarak hazırlanan %4-5 boşluğa sahip numunelerin hava geçirgenlikleri oldukça azdır. Bu sebeple yoğun gradasyonlu karışımlarda hava geçirgenliği önemli bir ölçüt değildir ve yaşlanma özelliklerinin incelenmesinde, değerlendirme kapsamına alınmamıştır.

-Çalışmalarının temelinde, karışımlarda minimum 0.00123 bitüm indeksi (bu değer ortalama 6 ile 8 μ bağlayıcı filmi kalınlığına karşılık gelmektedir) değerinin bir ölçüt olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Bitüm indeksi; karışımın bağlayıcı ağırlığının (lb), agrega yüzey alanına (ft²) oranıdır. Bu kavramın kullanılmasının nedeni, tüm agrega danelerinin bağlayıcı tarafından kaplanacağına ilişkin ortaya çıkabilecek kavram karmaşasını ortadan kaldırmaktır. Hava boşluğunun bitüm indeksine oranının karışımların yaşlanma özelliklerini önemli ölçüde etkilediği araştırmacılar tarafından ortaya atılmıştır. Bununla birlikte Marshall tasarımında maksimum boşluk oranı yerine yukarıda adı

5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN SUYA KARŞI DUYARLILIĞI

Agrega ve bitümlü bağlayıcıdan oluşan esnek yol üstyapılarında karşılaşılan sorunların arasında suya bağlı bozulmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu tip bozulmalar, kaplama tabakasının altında veya su içeriğinin en fazla olduğu aşınma ve binder tabakalarının arasında başlamakta ve yol yüzeyinde derin çukurluklar, yorulma çatlakları ve agrega danelerinin yol yüzeyinden ayrılması şeklinde görülmektedir.

Karışımların suya bağlı bozulmaları üç sınıfta incelenmektedir.

-Agrega daneleri ile bağlayıcı arasındaki bağın azalmasına bağlı bozulmalar (adezif bozulmalar),

-Bağlayıcı kohezyonunun azalmasına bağlı bozulmalar

-Donma gibi çevresel etkiler nedeni ile agrega danelerinin kırılmasına bağlı bozulmalar (Terrel ve Swailmi, 1987).

Adezif bozulmalar, bağlayıcının agrega danelerine yapışabilme özelliğini kaybedip, dane yüzeyinden ayrılması sonucu; kohezif bozulmalar ise, kütle halinde bulunan bağlayıcı filminin dışarıdan gelen etkiler nedeni ile akarak ince film halinde kopması sonucu oluşmaktadır.

Örneğin, kaplamadan sökülmüş olan agrega daneleri üzerinde asfalt lekeleri yoksa kaplamanın bozulma sebebi agrega daneleri ile bağlayıcı arasındaki adezyon yetersizliğidir. Kaplamadan ayrılmış olan agrega daneleri bağlayıcı ile sarılmış durumda ise, kaplamanın bozulma sebebi bağlayıcının düşük kohezyonlu olması ve çekme gerilmelerinin bağlayıcı filminin çekme dayanımını aşmış olmasıdır.

Brown (2001), bu iki tip bozulmadan adezyon bozulmasının, tamamen veya parçalı bir şekilde bağlayıcı ile agrega arakesitinde oluştuğunu, kohezyon bozulmasını ise bağlayıcı ve agrega düğümünün reolojik analizi ile açıklandığını belirtmiştir.

geçen oranın maksimum değeri (bu oran için 4 değerini önermişlerdir) kullanılarak geliştirilebileceğini önermişlerdir. Araştırmacıların kullandıkları formüller aşağıda verilmiştir.

$$\text{Film kalınlığı (mikron)} = \text{Bitüm indeksi} * 4870 \quad (4.6)$$

$$\text{Hava Boşluk (\%)} / [\text{Bitüm İndeksi} * 10^3] = 4.0 \text{ (maksimum)} \quad (4.7)$$

Kumar ve Goetz (1977), karışımların hava geçirgenliğine ilave olarak yaşlanmayı film kalınlığına bağlı olarak da incelemişlerdir. Tek boyutlu gradasyon ile yapılan karışımlarda, film kalınlığının hava geçirgenliğine oranının karışımların yaşlanma direncini belirleyen en iyi faktör olduğu sonucuna varmışlardır.

Kandhal ve Chakraborty (1996), bağlayıcı film kalınlığının karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar, yüksek hava boşluk oranına (8 ± 1) ve değişik asfalt film kalınlıklarına sahip numunelere esneklik modülü deneyi, ayrıca geri kazanılan bağlayıcı üzerine viskozite ve penetrasyon deneyleri uygulamışlardır. Araştırmacılar, esneklik modülü model eğrilerini film kalınlığına bağlı olarak incelemişler ve 9-10 μ film kalınlıklarının bir özellik taşıdığı; eğrinin 9-10 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, başka bir deyişle, yaşlanma etkisinin arttığı, 9-10 μ 'nun üstündeki kalınlıklarda yatıklaştığı başka bir deyişle, yaşlanmanın etkilerinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Yukarıda belirtilen çalışmalar, bağlayıcı film kalınlığının karışımların yaşlanma özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Film kalınlığı, karışım içindeki bağlayıcı içeriği ile ilişkilidir ve bu kalınlığın optimum değerinin saptanması son derece önemlidir. Çünkü film kalınlığının gerekenden fazla olması, kaplamanın deformasyon direncini azaltacak; film kalınlığı gerekenden az ise, kaplama kırılabilir olacaktır.

Kaynaklarda kohezyonun tanımına sık rastlanmamakla birlikte, karışımın kohezif direncinin adezyon kapasitesindeki düşmeden kaynaklandığı bilinmektedir.

İnce film halinde bulunan bağlayıcıların karışım içinde sudan nasıl etkilendiği henüz ispatlanamamıştır. Ancak kaplama içindeki boşluklara nüfuz eden su basıncı nedeni ile bağlayıcının dane yüzeyinden sıyrılmadan kopması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir (Fromm, 1974).

Karışımların suya karşı duyarlılıkları bağlayıcıların adezyon ve kohezyon yeteneklerine bağlı olmasına karşın, araştırmalar daha çok bağlayıcı filmi ile agrega daneleri arasındaki bağın zayıflaması sonucu oluşan bozulmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Kaynaklarda bu tip bozulmalar soyulma olarak tanımlanmaktadır.

5.1 Bitümlü Sıcak Karışımların Suya Karşı Duyarlılıklarını Etkileyen Faktörler

Karışımların suya karşı duyarlılıkları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Agrega cinsi,
- Bağlayıcı cinsi,
- Karışım tasarımı ve yapımı
- Çevresel faktörler
- Trafik etkileri (Stuart, 1990).

Tablo 5.1’de bu faktörler ayrıntılı olarak verilmektedir.

5.1.1 Agregat Etkisi

Agreganın suya bağlı bozulmalar üzerinde etkilerini değerlendirmeye ilişkin çalışmalar üç olguya ayrılmaktadır (Stuart, 1990).

- Yüzey enerjisi,
- Kimyasal bağ,
- Mekanik etkileşim (mechanical interlock).

Tablo 5.1 Suya karşı duyarlılığı etkileyen faktörler (Stuart, 1990)

1-Agrega • <u>Agrega Kompozisyonu</u> -Yüzey Kimyası -Mineral Türü -Agrega Kaynağı -Asitlik Derecesi, pH • <u>Fiziksel Özellikler</u> -Köşelilik -Yüzey Pürüzlülüğü -Yüzey Alanı -Gradasyon -Gözeneklilik -Geçirgenlik • <u>Kum ve kil içeriği</u> • <u>Su içeriği</u> • <u>Bozulmaya Karşı Dayanımı</u>
2-Bağlayıcı • <u>Kimyasal Kompozisyonu</u> • <u>Sertliği</u> • <u>Damıtma İşlemi ve Ham Petrolün Kaynağı</u>
3-Karışım Tasarımı ve Yapımı • <u>Hava Boşluk Oranı ve Sıkışma Düzeyi</u> • <u>Geçirimsizlik ve Drenaj</u> • <u>Film Kalınlığı</u>
4- Çevresel Faktörler • <u>Sıcaklık</u> • <u>Donma- Çözülme Döngüsü (Freeze-thaw cycles)</u> • <u>Nem veya Rutubet Durumu</u> • <u>Kaplama Yaşı</u>
5- Trafik

Kaplamalarda görülen soyulma ve diğer suya bağlı bozulma davranışlarının yukarıda sayılan üç olgunun kombinasyonuna bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu olgulara bağlı teoriler, bağlayıcı-agrega-su arakesitini değerlendirmelerine karşın, birçok çalışma bağlayıcı etkilerinden çok agrega etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Agregatipinin sudan kaynaklanan bozulmalar üzerine büyük etkiye sahip olduğuna inanılmaktadır.

Yüzey enerji teorileri malzemelerin, serbest yüzey enerjilerini azaltarak termodinamik olarak nasıl daha dengeli hale geldiklerini incelemektedir. Kimyasal bağ çalışmaları, malzemelerin kimyasal yapılarını ve kimyasal reaksiyonları adezyon ile ilişkilendirmeye çalışmaktadır. Her iki olguda da bağlayıcı içindeki moleküller

arakesitte kendilerini dengeleyerek adezivitelerini arttırmaktadırlar. Bağlayıcının arakesit bölgesi, kütle halindeki bağlayıcı ile absorpsiyonun meydana geldiği agrega ve bağlayıcının değme bölgesi arasındaki bağlayıcı tabakanın bir bölümüdür. Her iki olgu da, bağ dokusunu değişik yönlerden incelemektedir. Mekanik etkileşim ise, agreganın fiziksel özellikleri üzerinde durmaktadır (Majidzadeh and Brovold, 1968).

- Yüzey enerji teorileri

Yüzey enerji teorileri, yüzey moleküllerinin dengesiz yüke sahip olduklarını ve bu yüklerin yüzey moleküllerini birbirlerine çektiklerini belirtmektedir.

Serbest yüzey enerjisi (kuvvet*uzunluk); yüzey moleküllerinin sahip oldukları enerji ile, arakesitteki moleküllerin sahip oldukları enerji farkıdır. Bu da, yüzey gerilimi (kuvvet/uzunluk) ile malzemenin yüzey alanı çarpımına eşittir. Serbest yüzey enerjisi yüzeyde depolanan enerjidir. Malzemeler serbest yüzey enerjilerini en aza indirmeye çalışmaktadırlar. Eşit viskoziteye sahip iki sıvıdan düşük yüzey gerilimine sahip olanı, birim alanda daha az serbest yüzey enerjisine sahip olacağından katı üzerinde daha fazla yayılacaktır. Genel olarak, yüzey gerilimi ile serbest yüzey enerjisi sıcaklık artışı ile düşmektedir (Stuart, 1990).

Tablo 5.2’de bağlayıcı, su ile çeşitli malzemelerin yüzey gerilim değerleri verilmektedir (Thelen, 1958).

Tablo 5.2 Malzeme cinslerine ilişkin yüzey gerilme değerleri (Thelen, 1958)

Malzeme Cinsleri	Yüzey Gerilme Değerleri (Dyn/cm)
Kayalar veya Mineraller ile Bağlayıcı	
Kireçtaşı ve bağlayıcı	21-26
Kum ve bağlayıcı	22-30
Kuartz ve bağlayıcı	30
Kayalar veya Mineraller ile Su	
Kireçtaşı ve su	58-64
Silika kumu ve su	83
Bağlayıcı ve su	0-16
Kum ve zift	40.5

Yukarıdaki tablo incelendiğinde, kireçtaşı ile bağlayıcı arasındaki yüzey gerilme değerinin, dolayısı ile serbest yüzey enerjisinin diğerlerine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bu durum da kireçtaşı ile bağlayıcı arasında bağın daha fazla olduğunu göstermektedir.

Bağlayıcı üzerinde yapılan çalışmalar, yüksek polariteye sahip suyun bağlayıcıyı, birçok agrega üzerinden sıyrabileceğini göstermiştir. Çünkü polar sıvılar, polar olmayanlara kıyasla agregaların yüzey enerjilerini azaltmaktadırlar (Stuart, 1990).

Tablo 5.2’de görüleceği gibi agrega ile su arasındaki yüzey enerjisi, agrega ile bağlayıcı arasındaki enerjiye göre daha fazladır. Bu durum suyun olumsuz etkisini meydana getirmektedir. Ancak soyulma olayı tek başına su ile bağlayıcıya bağlı değildir. Soyulma kavramı değerlendirilirken karışım özellikleri de gözönüne alınmalıdır.

Yüzeysel çekim yaklaşımında Şekil 5.1’de görülen kuvvetlerin dengesi, formül 5.1’deki eşitlik ile sağlanmaktadır.

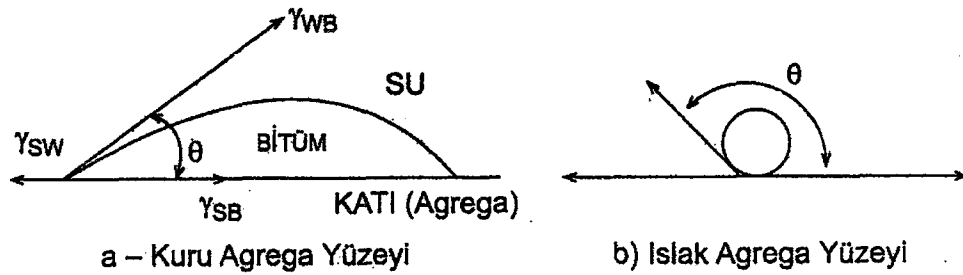
$$\gamma_{SB} - \gamma_{SW} = \gamma_{WB} * \cos\theta \quad (5.1)$$

γ_{SB} = Agrega-su yüzeysel çekimi

γ_{SW} = Agrega-bitüm yüzeysel çekim

γ_{WB} = Bitüm-su yüzeysel çekim

θ = Bitüm değme açısı



Şekil 5.1 Agrega-bitüm-su fazında değme açısı (Stuart, 1990)

Agrega-bitüm-su fazındaki yüzeysel gerilme değerleri ve değme açıları aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

-Deney sıcaklığı,

-Agrega danesinin pürüzlülük özellikleri,

-Atmosferik etkiler,

-Bağlayıcının emilme (adsorbsiyon) derecesi,

-Su taneciğinin büyüklüğü ve adsorbsiyonu gibi faktörlere bağlıdır.

Genel olarak, değme açısı ne kadar küçük ise, adezyon da o kadar artmaktadır (Voyutsky, 1978).

Kaynaklarda, adezyonun minimum değme açısına ve serbest yüzey enerjisine bağlı olduğu bilinmesine karşın, bağlayıcı-agrega-su fazının özellikleri tam olarak açıklanamamış ve modeller geliştirilememiştir. Bu alanda yapılan deneysel çalışmalar birçok kabuller içermekte ve yapılan kabuller de kaplamada meydana gelen soyulmayı tam olarak temsil edememektedir.

Agregalarda dengesiz yüzey yüküne sahip olan daneler enerjilerini vererek, bağlayıcı ile daha fazla adeziv bağ oluşturmakta ve suya karşı duyarlılıklarını azaltmaktadırlar (Stuart,1990).

• Kimyasal Bağ

Kimyasal bağ üzerine yapılan araştırmalar, agreg a ile bağlayıcı arasında adeziv kuvveti etkileyen, suda çözünmeyen kovalent bağ oluştuğunu göstermiştir. Bu bağ, agreg a ve bağlayıcının pH değerine bağlıdır. Malzemenin pH değeri hidrojen-iyon aktivitesine işaret etmektedir. Bu değerin 7 den küçük olması, hidrojen-iyon yoğunluğunun ve asidik özelliklerinin arttığını; 7'den büyük olması ise hidrojen-iyon yoğunluğunun azaldığını ve bazik özelliklerinin arttığını göstermektedir (Majizadeh, 1968).

Malzemelerin pH değerlerini ölçmeye bağlı kimyasal bağ çalışmaları asidik bir malzeme ile bazik bir malzeme arasında çok kuvvetli bir bağ oluştuğunu belirtmektedir. Bağlayıcıların kimyasal bağa ilişkin deneylerinde daha fazla asidik özellik gösterdikleri belirlenmiştir. Bu durum, bazik agregaların çok kuvvetli bağ, asidik agregaların ise zayıf bağ oluşturdukları sonucunu doğurmaktadır (Gzernski, 1970).

Mack (1964), agregaları hidrofilik ve hidrofobik (lipofilik) olarak iki bölümde incelemiştir. Hidrofobik agregaların bazik tipte ve sudan çok bitümlü malzemeye karşı bir çekim içerisinde olduğunu, hidrofilik agregaların ise asidik tipte ve soyulmaya karşı daha yatkın olduklarını belirtmiştir.

Kimyasal bağa ilişkin yapılan çalışmalar agregaların asidik ve bazik özelliklerini yalnızca pH değerlerine bağlı olarak değil, kimyasal bileşimleri açısından da incelemiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi agregalar hem bazik hem de asidik davranış göstermektedirler ve kimyasal bileşimleri gözönüne alındığında asidik dereceleri, içerdikleri silika (SiO_2) yüzdelerine bağlıdır. Silika yüzdesi, agregaların bağlayıcıya yapışma özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Yüksek silika içeren agregaların asidik tipte olduğu; düşük silika içeren veya hiç içermeyen agregaların ise bazik tipte olduğu kabul edilmektedir (Rice, 1959). Tablo 5.3'te bazı agregaların silika içerikleri gösterilmektedir.

Tablo 5.3 Bazı agregaların silika içerikleri (Rice, 1959)

Agrega Cinsi	Silika İçeriği (%)
Granit	68.3
Kuvarsit	74.2
Kumtaşı	76.1
Kireçtaşı	3.8
Dolomitik Kireçtaşı	16.2
Bazalt	51.7

- Mekanik Etkileşim

Agrega köşelliliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün artması, mekanik etkileşimi arttırmakta, bu durum da suya bağlı bozulmaların etkilerini azaltmaktadır. Ancak agreganın köşelliliği arttıkça homojen bir bağlayıcı film kalınlığı elde etmek oldukça güç olabilmektedir. Çok keskin kenarlarda bağlayıcı filmi çok incelmekte ve kırılmaya karşı duyarlı hale gelmektedir. Agreganın köşelliliğinin ve pürüzlülüğünün artması agreganın ile bağlayıcı arasındaki yüzey veya değme alanını da arttırmaktadır.

Bu durum, artan mekanik etkileşime bağlı olarak karışımın bağlayıcı ihtiyacını da arttıracaktır (Stuart, 1990).

Agrega köşeliliği ve bağlayıcı ile olan değme alanı agregada danelerini kırarak arttırılabilmektedir. Ancak yüzey enerji faktörlerinin de gözönüne alınması gereklidir. Kırma işlemi sırasında yeni dengesiz kuvvetler oluşabilmekte, bu durum da bağlayıcı ve agregada tipine bağlı olarak suya karşı duyarlılığı arttırmakta veya azaltmaktadır. Araştırmacılar, genellikle kırma işleminin sudan kaynaklanan bozulmaları arttırdığını belirtmektedirler (Thelen, 1958).

Bağlayıcı ile agregada arasında mekanik etkileşim ve değme alanı, agregada gradasyonuna da bağlıdır. Kaynaklarda bu konuya ilişkin bilgilere rastlanmamaktadır. Ancak agregada karışımının gradasyon değerleri üzerinde değişiklikler yapılarak kaplamanın suya karşı daha az duyarlı hale getirilebileceği düşünülmektedir (Stuart, 1990).

Agregada gözenekliliğinin artması ile değme alanının ve bağlayıcı absorpsiyonunun arttığı bilinmektedir. Ancak uzun dönem bağlayıcı absorpsiyonunun, karışımların suya karşı duyarlılığına etkisi tam olarak anlaşılmış değildir. Agregada geçirgenliği ise, suyun agreganın bir noktasından diğer bir noktasına difüzyonuna olanak verdiğinden istenmeyen bir faktördür (Stuart, 1990).

Toz ve kil içerikleri bağlayıcı-agregada arasında kanallar yaratarak suyun etkilerini arttırmaktadırlar. Araştırmalar, suyun var olduğu durumlarda, toz minerallerinin bağlayıcıyı emülsifiye ederek soyulmaya yol açtığını göstermiştir (Matheuws, 1958).

Agreganın su içeriğindeki artış, bağlayıcının adezivitesini düşürmektedir. Plentte karıştırma sırasında agregada daneleri tam olarak kurumuş gözüktüğü halde, daneler üzerinde dengesiz kuvvetleri azaltan adsorbe edilmiş su tabakaları bulunmaktadır. Bu adsorbe edilmiş su tabakalarının soyulma üzerine etkileri tam olarak anlaşılmış değildir (Thelen, 1958).

5.1.2 Bitümlü Bağlayıcı Etkisi

Bağlayıcının sertliği, suya karşı duyarlılık üzerinde etkili olabilmektedir. Isıtılan bağlayıcının viskozite değeri, karıştırma işlemi sırasında tüm agregada danelerinin

bağlayıcı ile kaplanmasına olanak verecek şekilde, yeterince düşük olmalıdır. Karışım zamanı da aynı derecede önemlidir. Tüm danelerin sarılmasından sonra normal sıcaklıklarda, sert bağlayıcıların dane üzerinden sıyrılması çok zor olmakta ve suya bağlı bozulmalara karşı dirençleri artmaktadır. Ancak bu direncin yalnızca bağlayıcının sertliği ile ilişkili olup olmadığı tam olarak bilinmemektedir (Kennedy ve diğ., 1984).

Bağlayıcının kimyasal bileşiminin suya karşı duyarlılık üzerinde etkilerine ilişkin çalışmalar kısıtlıdır. Araştırmacılar daha çok agrega danelerinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Plancher ve diğ. (1977), bağlayıcıların kimyasal gruplarını ve bu grupların su ile yer değiştirme özelliklerini incelemişlerdir. Uyguladıkları deneyler, bu gruplardan karboksilik asitlerin, anhidritlerin ve sülfoksitlerin su ile kolay yer değiştirebildiklerini göstermiştir. Ancak adı geçen araştırmacılar, karboksilik asit ve sülfoksit gruplarının suya bağlı bozulmalar üzerinde etkilerine ilişkin bir model geliştirememişlerdir.

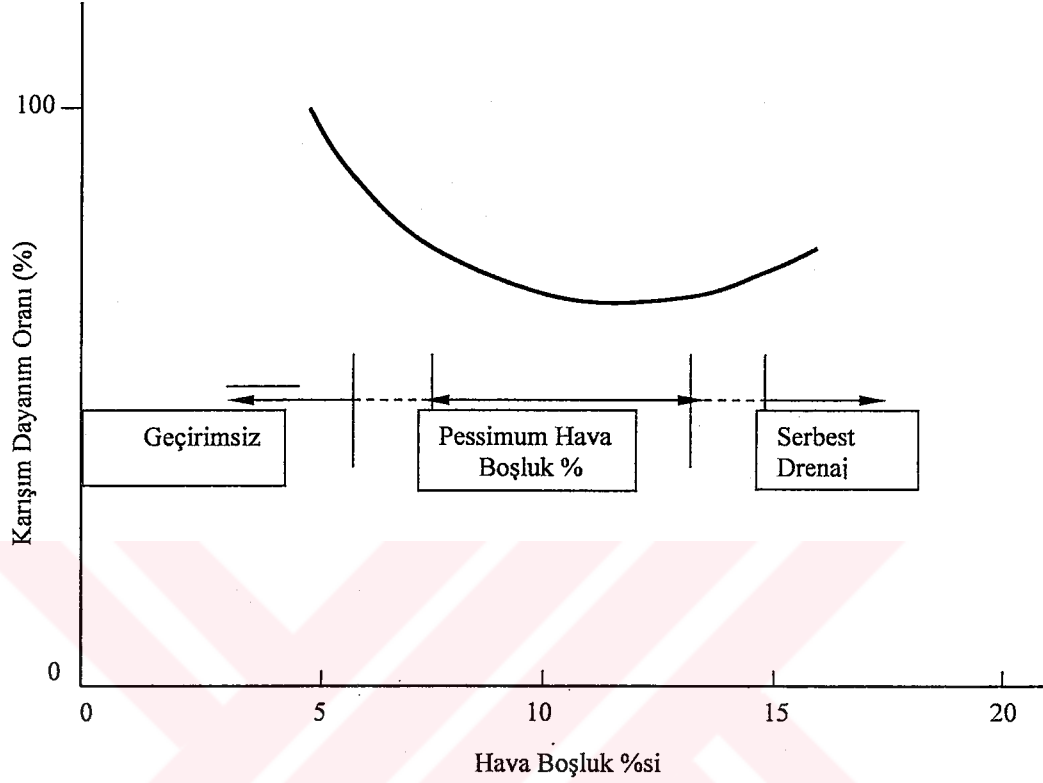
Bağlayıcı kaynağının ve damıtılma şeklinin de suya karşı duyarlılık üzerinde etkileri gözönüne alınmalıdır. Çünkü kaynağı aynı olan bağlayıcıların bile birbirlerine göre değişik özellikleri olabilmektedir (Stuart, 1990).

5.1.3 Karışım Tasarımı ve Yapım Etkisi

Karışımların sıkıştırılma düzeylerinden, bağlayıcı içeriklerinden ve agrega gradasyonundan etkilenen hava boşluk içerikleri ve geçirgenlikleri, kaplamaların drenaj ve suya doygunluk derecelerinin kontrolü bakımından önemlidir. Genel olarak kaplamalarda hava boşluk yüzdelerindeki artış, suyun bu boşluklara nüfuzunu ve suya bağlı bozulmaları arttıracaktır (%15-%25 boşluk oranına sahip açık gradasyonlu karışımlarda durum farklıdır çünkü bu tip karışımlarda su, boşluklarından içinden geçerek alt tabakalara etki etmeden kaplamayı terk etmektedir) (Abson ve Burton, 1966).

Hava boşluğu içeriklerinin karışımların dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 5.2’de görülmektedir. Yatay eksen de hava boşluk yüzdeleri, düşey eksen de ise, karışım dayanım oranları verilmektedir.

Bu oran, koşullandırılmış numunenin (vakum ile doyurulmuş numuneler üzerinde donma-çözülme işlemleri uygulanmış) indirekt çekme gerilme değerinin, kuru numunenin indirekt çekme gerilme değerine bölünmesi şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 5.2 Karışımların hava boşluk içeriklerine bağlı dayanımları (Terrel ve Swailmi, 1987)

Terrel ve Swailmi (1987), hava boşluk yüzde değişimlerini üç ayrı bölümde incelemişlerdir:

1. bölüm düşük hava boşluklarını içeren karışımlardır. Hava boşluk değerleri küçük olduğu için, karışımlar geçirimsizdir. Karışımlarda düşük hava boşlukları bağlayıcı miktarının artırılması ve gradasyonun ayarlanması ile sağlanabilmektedir.
2. bölüm pessimum hava boşluk içeren karışımlardır. Pessimum, kaynaklarda optimumun karşısı olarak tanımlanmaktadır. Bu tip boşlukları içeren karışımlar yolun performansını ve servis ömrünü olumsuz yönde etkilemektedirler ve suyun etkilerine karşı çok duyarlıdır.
3. bölüm açık gradasyonlu ve suyun drenajına olanak veren karışımlardır.

Majidzadeh (1968), film kalınlıklarının bitümlü sıcak karışımların suya karşı duyarlılığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Majidzadeh çalışmasında, karışımlarda

bağlayıcı içeriğinin arttırılması ile film kalınlığının artacağını ve bu nedenle geçirgenliğin düşerek suya karşı duyarlılığın azalacağını belirlemiştir.

5.1.4 Çevresel Faktörlerin Etkisi

Donma ve çözülme olaylarına bağlı su hareketleri ve yarattıkları basınçlar, bağlayıcı filminin kırılmasına yol açarak soyulmayı arttırmaktadırlar. Düşük sıcaklık ve yorulma çatlakları da suyun çatlaklara girmesine olanak verdiğinden suyun etkilerini arttırmaktadırlar.

Sıcaklığın etkisi de gözönüne alınması gereken bir faktördür. Yol üzerinde yapılan çalışmalar, soğuk havalarda yağmur suyunun adezyon üzerinde olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu tip çevresel koşullarda sıkıştırma işlemi zor olacağından, kaplamada hava boşluğu oranları ve geçirgenlikleri fazla olacak ve suya karşı duyarlılık artacaktır (Abson ve Burton, 1966).

Yaşlanma, bağlayıcıların sertliğini arttırmakta ve bu durum da suya karşı duyarlılığı azaltabilmektedir. Yaşlanma olayı, bağlayıcının kimyasında ve yüzey enerjilerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Bu değişikliklerin suya bağlı bozulmalar üzerindeki etkileri bilinmemektedir (Stuart, 1990).

5.1.5 Trafiğin Etkisi

Trafiğin etkisi ile bağlayıcı, agrega daneleri üzerinden ayrılabilmekte ve çatlaklar oluşturabilmektedir. Bu durum da suyun kaplama içine girmesine neden olmakta ve suya karşı duyarlılığı artırmaktadır.

Yukarda anlatılanların ışığında suya karşı duyarlılığı etkileyen faktörler aşağıdaki biçimde özetlenebilmektedir.

-Agrega danelerinin kurutulma sıcaklıklarının artırılması,

-Agrega danelerinin köşeliliğinin, pürüzlülüğünün artırılması,

-Bağlayıcı film kalınlığının artırılması,

-Hava boşluk oranı ve geçirgenliğin azaltılması,

-Uygun bir drenajın sağlanması,

-Agrega danelerinin düşük sıcaklık ve donma-çözülme etkilerine bağlı olarak oluşan çatlakların azaltılması,

-Agrega danelerinin üzerindeki toz zerreciklerinin uzaklaştırılması,

karışımların suya karşı duyarlılıkları azalmaktadır.

Soyulmayı etkileyen faktörler gözönüne alındığında, her çeşit agreganın soyulabildiği görülmektedir. Agregaları soyulma potansiyellerine göre sınıflandırmak zordur. Çünkü her zaman soyulmaya dirençli veya her zaman soyulabilen agregaya yoktur. Agregada gradasyonu, agreganın kaynağı ve bağlayıcı özellikleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Karışımların hava boşluk oranları, çevresel faktörler ve trafik düzeyi, suya bağlı bozulmalar üzerinde son derece önemlidir.

Deneysel çalışmalarda suya bağlı bozulmalar üzerinde asfalt filmi kalınlığının etkisi incelenmiş ve optimum asfalt filmi kalınlığı saptanmıştır.

5.2 Suya Karşı Duyarlılığa İlişkin Deney Yöntemleri

Karışımların suya bağlı bozulmalarını değerlendirmek için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Uygulanan deneyler aşağıda ana hatları ile anlatılmış ve günümüzdeki uygulama alanları belirtilmiştir.

-Statik Suya Daldırma Deneyi (Static Immersion Test)-AASHTO T182/ASTM1664

Deney, 3/8 inç (9.5 mm) elek ile No.4 (4.75 mm) elek arasında kalan malzemeler üzerine uygulanmaktadır. Sıcak karışım, agreganın ağırlığının %5.5'i kadar bağlayıcı ile hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış karışım, 25°C'de saf su içinde 16-18 saat bekletildikten sonra, agreganın bağlayıcı ile sarılma yüzdesi gözle incelenmekte ve soyulmaya karşı dayanıklılık tespit edilmektedir. Karışımların bağlayıcı ile sarılma yüzdesi %95'ten az ise, karışım suya karşı duyarlı olarak tanımlanmaktadır.

-Kaynayan Su Deneyi (Boiling Water Test)-ASTM D3625

Deney, statik suya daldırma deneyi ile benzer uygulamalara sahiptir. Ancak deneyde, hazırlanan sıkıştırılmamış karışım, ya kaynayan su içinde 10 dakika, ya da 25°C'deki su içine konulduktan sonra suyun kaynama sıcaklığına erişmesine kadar bekletilmektedir. Agregada danelerinin bağlayıcı ile sarılma derecesi, bağlayıcı ile kaplanan yüzeyin tüm yüzeye oranı şeklinde görsel olarak belirlenmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Kaynayan su deneyi (Stuart, 1990)

Bu deney, kaynayan su içinde uygulandığı için tercih edilmemekte ve soyulmaya karşı kullanılan katkıların özelliklerini değiştirebilmektedir (Stuart, 1990).

-Suya Daldırılmış Numuneler Üzerine Basınç Deneyi (Immersion-Compression Test)-AASHTO T165/ASTM D1075

Deney, 4 inç (10.2 cm) çapında ve 4 inç (10.2 cm) yüksekliğinde, 3000 psi (20.7 mPa) basınç altında sıkıştırılmış numuneler üzerine uygulanmaktadır. Sıkıştırma süresi yaklaşık 2 dakikadır. Numuneler, saf su içinde, 48.9°C'de 4 gün veya 60°C'de 1 gün boyunca koşullandırılmaktadır. Koşullandırılan numuneler üzerine dakikada 0.05 inç (1.27 mm) sabit hızda ve 25°C'de basınç deneyi uygulanmaktadır. Aynı deney koşullandırılmamış (kuru numuneler) üzerine de uygulanmaktadır.

Koşullandırılmış ve kuru numunelerden elde edilen basınç değerlerinin oranı, karışımın suya karşı duyarlılığını göstermektedir. Bu oran %70'den küçük ise karışım suya karşı duyarlı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5.4).



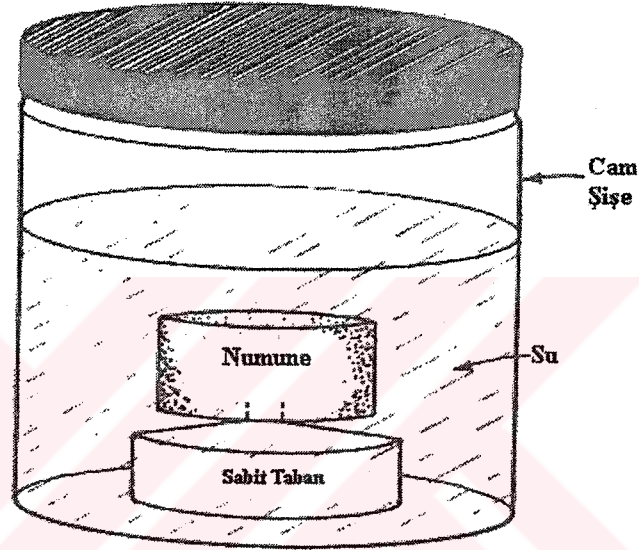
Şekil 5.4 Serbest basınç aleti (Stuart, 1990)

-Stabilite Deneyleri ile Koşullandırma (Conditioning with Stability Test)-AASHTO T245

Deney, yukarıda anlatılan deney yöntemi ile aynı şekilde uygulanmaktadır ancak AASHTO T165'ten farklı olarak 4 inç (10.2 cm) çapında, 2.5 inç (6.4 cm) yüksekliğinde numuneler kullanılmakta ve deney Marshall deneyine ait aletler ile gerçekleştirilmektedir.

-Teksas Donma Çözülme Deneyi (Texas Freeze-Thaw Pedestal Test)- Kennedy ve diğ. (1982)

Deney, No.20 elek ile No.40 elek arasında kalan agregalar kullanılarak hazırlanan, 0.625 inç (41.3 mm) çapında ve 0.75 inç (19.1 mm) yüksekliğinde numuneler üzerine uygulanmaktadır. Elde edilen numuneler, içi su ile dolu cam bir şişe içinde sabit tabanlı bir plaka üstüne yerleştirilmektedir (Şekil 5.5).

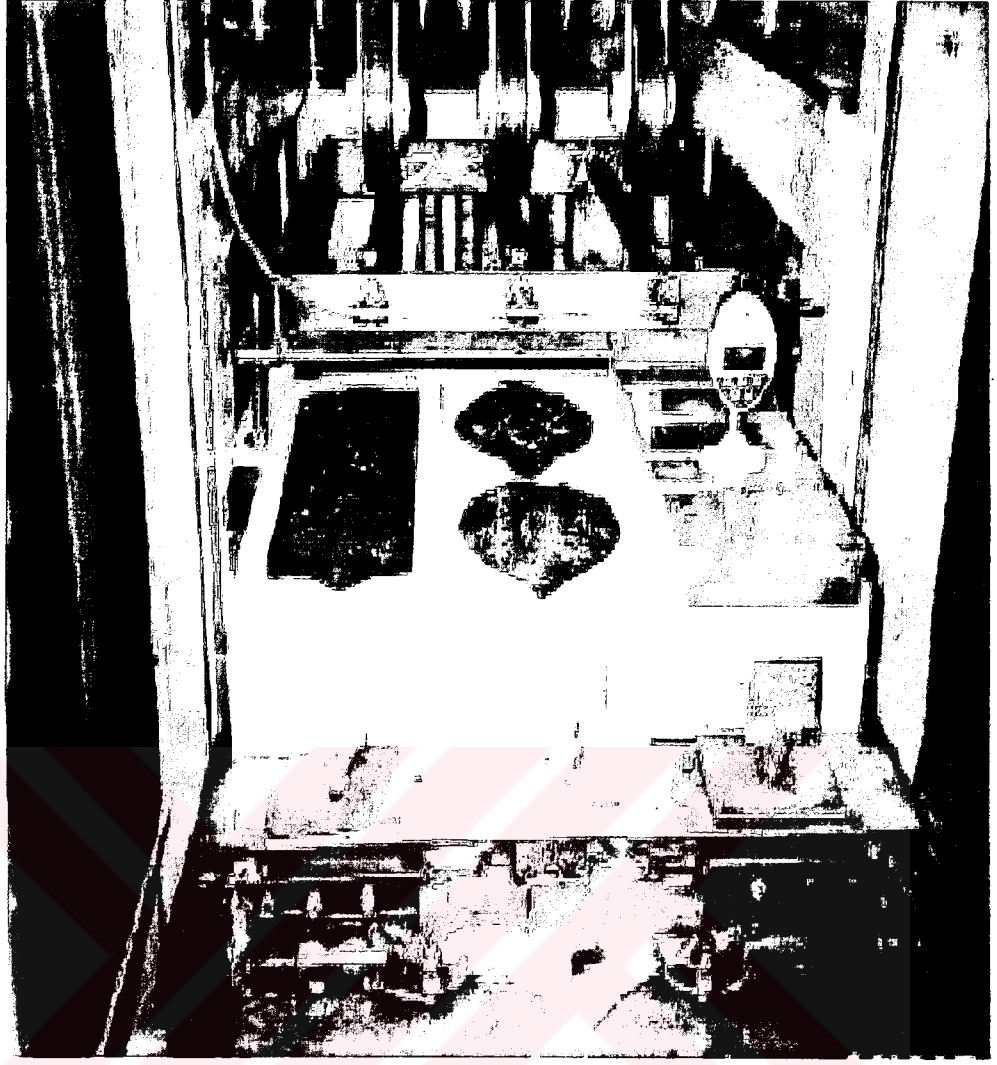


Şekil 5.5 Sabit tabanlı Teksas donma-çözülme aleti (Graf, 1986)

Çam şişe üzerinde donma (-17.8°C) ve çözülme (48.9°C) uygulanmaktadır ve bir döngü yaklaşık 24 saat sürmektedir. Numunenin sudan kaynaklanan dayanımı hakkında bilgi edinebilmek için, numune üzerinde kırılma görülünceye kadar donma-çözülme döngüleri tekrarlanmaktadır.

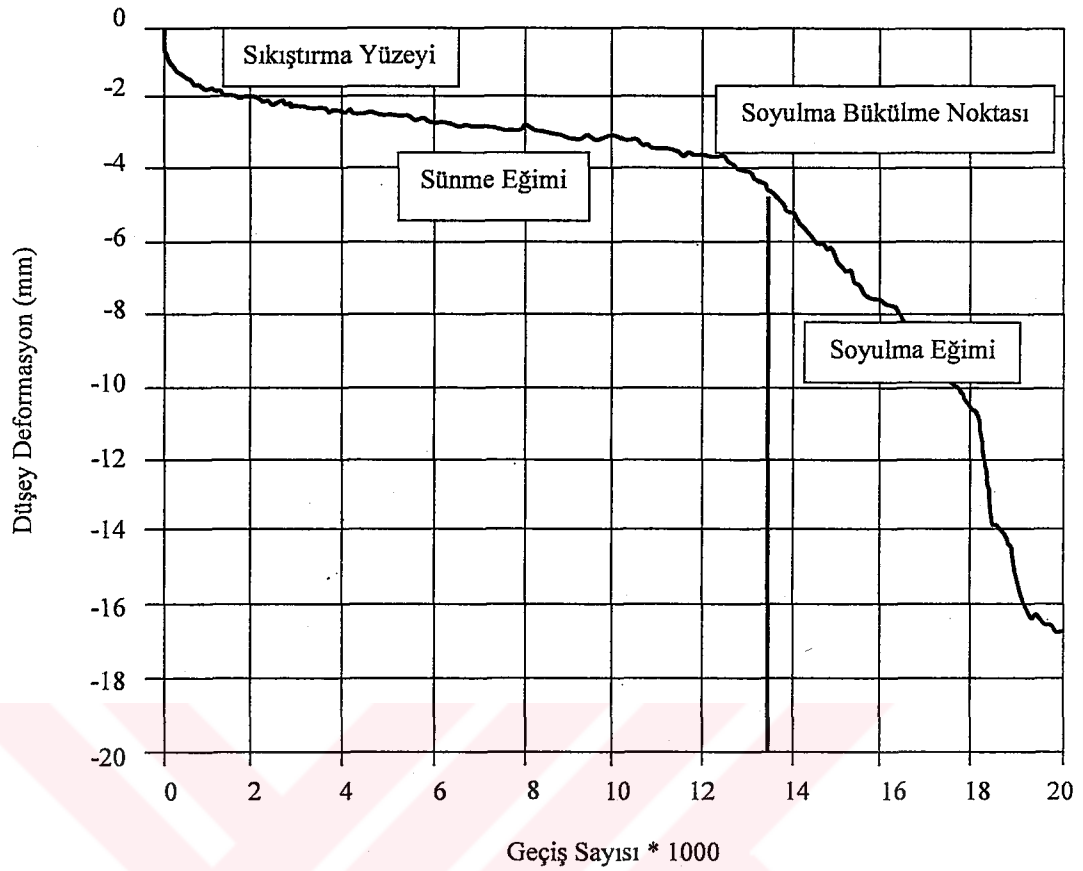
-Hamburg Tekerlek İzi Deneyi (Hamburg Wheel Tracking Device)-Aschenbrener ve diğ. (1995)

Deney, 260 mm kalınlığında, 320 mm genişliğinde, 40 mm kalınlığında ve $\%7 \pm 1$ hava boşluğu içeren dikdörtgen kesitli bitümlü karışım numunelerine uygulanmaktadır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Hamburg tekerlek izi deneyi (Aschenbrener ve diğ., 1995)

50°C'lik su içine yerleştirilen numune üzerinden, 47 mm genişliğinde 705 N'luk yük uygulayabilen çelik bir tekerlek geçirilmektedir. 1 dakikada 50 tekerlek geçişi elde edilmektedir. Tekerlek hızı saniyede 340 mm.'dir. Her numune üzerinden 20000 geçiş veya 20 mm deformasyon elde edilinceye kadar geçiş işlemine devam edilmektedir. Bu haliyle deney yaklaşık 6.5 saat sürmektedir. Örnek deney sonuçları Şekil 5.7'de verilmektedir. Şekilde, sünme-eğim, soyulma-eğim ve soyulma-bükülme noktası değerleri numunenin özelliklerini değerlendirmek bakımından önemlidir. Sünme-eğim değeri, numunenin plastik akma özelliğini; soyulma-bükülme noktası değeri, numunenin sudan kaynaklanan bozulmalara karşı gösterdiği direnci; soyulma eğim değeri ise, sudan kaynaklanan bozulmanın şiddetini göstermektedir.

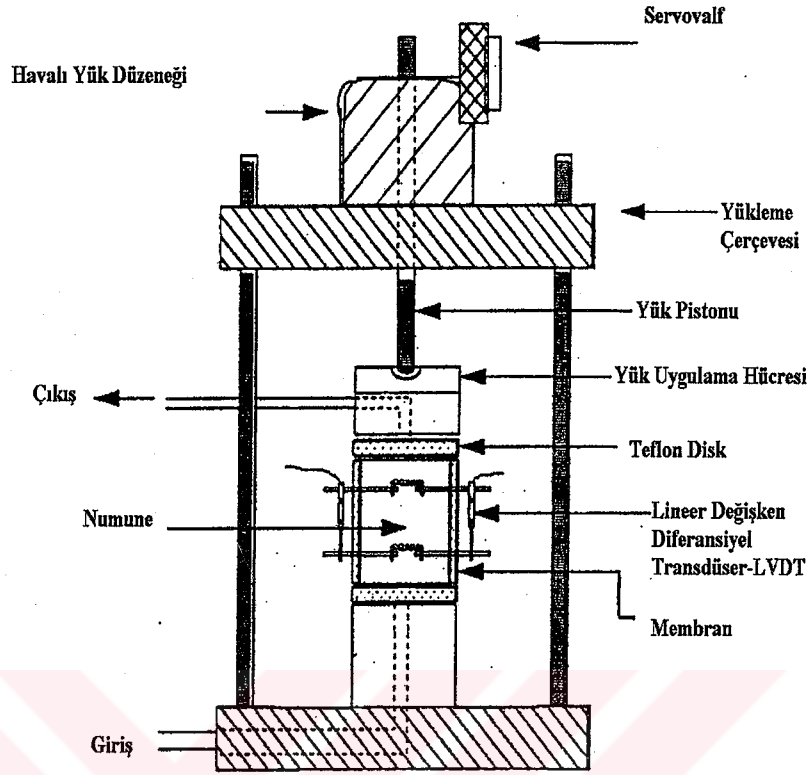


Şekil 5.7 Hamburg tekerlek izi test sonuçları (Aschenbrener, 1995)

-Çevresel Koşullandırma Sistemi (Environmental Conditioning System)-AASHTO TP34

Bu deney sistemi, SHRP (Strategic Highway Research Program- Stratejik Yol Araştırmaları Programı) bünyesinde geliştirilmiştir. Deney, 102 mm çap ve yüksekliğe $7.5 \pm 0.5\%$ hava boşluk oranına sahip kuru ve koşullandırılmış numuneler üzerine uygulanmaktadır (Şekil 5.8).

Sıcak karışım kısa dönem yaşlandırıldıktan sonra (AASHTO PP2-94), sıkıştırılarak üzerine yaklaşık 30 dakika 68 ± 3 kPa (510 ± 3 mmHg) vakum uygulanmakta ve koşullandırma işlemine geçilmektedir. Koşullandırma işlemi, sıcak ve soğuk döngülerden oluşmaktadır.



Şekil 5.8 Çevresel koşullandırma sistemi (Swailmi ve Terrel, 1993)

Sıcak döngü işleminde, numune üzerine 6 saat boyunca 60°C 'de tekrarlı yük uygulandıktan sonra numune 25°C 'de iki saat bekletilmektedir. İki kez tekrarlanan bu işlemin sonunda numune üzerine esneklik modülü deneyi uygulanmaktadır. Soğuk döngü ise, numunenin tekrarlı yük uygulanmadan, 6 saat boyunca -18°C 'de bekletilmesi işlemini içermektedir (Bu işlem bölgenin iklim özelliklerine bağlıdır ve uygulanmayabilir). Koşullandırılmış ve kuru numunelerin esneklik modülü değerleri oranı, numunenin suya karşı duyarlılığını göstermektedir.

-Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci için Standart Deney Metodu (AASHTO T283).

Deney, Lottman (1982) tarafından geliştirilmiş ve standartlara dahil edilmiştir. Sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suya karşı duyarlılıklarını tespit etmek için AASHTO TP34 kadar sıkça başvurulmuş bir deney yöntemidir. Bu deneyin uygulanışına ilişkin ayrıntılı bilgiler deneysel çalışmalar bölümünde verilmiştir.

Araştırmacıların çoğu bu iki deney yönteminin birbirlerine göre üstünlüklerini değerlendirmişlerdir.

Tandon ve diğ. (1996), AASHTO T283 deney yönteminin, AASHTO TP34 yöntemi ile karşılaştırıldığında daha gerçekçi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Terrel ve Swailmi (1993), deneysel çalışmalarında, AASHTO TP34 deney yöntemini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda deneyler sırasında kullandıkları numuneleri tek bir deney aleti ile koşullandırdıkları için, sonuçların hata oranlarının ve değişkenliğinin azaldığını ve karışımların sudan kaynaklanan bozulmalarının AASHTO T 283'e göre daha iyi temsil edildiğini göstermişlerdir.

Aschenbrener ve diğ. (1995), AASHTO T283 deney yönteminin özellikle suya karşı çok duyarlı olduğunu ve kireç katkılı karışımlarda çok iyi sonuçlar verdiğini ancak, AASHTO TP34'e göre daha ağır test koşullarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

6. LABORATUARDA YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ALETLER, DENEY YÖNTEMLERİ VE MALZEMELER

Çalışmanın bu bölümünde, University of Maryland Yollar Laboratuvarları'nda yapılan deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Öncelikle, laboratuvarda kullanılan aletlere ilişkin ayrıntılı bilgiler verilecektir. Deneylerde kullanılan malzeme özelliklerinin saptanmasından sonra değişik film kalınlıklarıyla hazırlanan numuneler üzerine yaşlanma ve suya bağlı bozulmaların etkilerini incelemek üzere uygulanan esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi deneyleri ve sonuçları üzerinde durulacaktır.

6.1 Kullanılan Aletler

Bu bölümde deneylerde kullanılan aletler ve işlevleri tanıtılacaktır.

6.1.1 Dönel Viskometre

Ortak eksenli döner bir silindire sahip olan viskometre, farklı özellikteki bağlayıcıların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 6.1). Kılcal tüp viskometrelerin tersine, bu aletin hem modifiye hem de normal bağlayıcılar ile kullanılabilmesi mümkündür.

Viskoziteyi ölçen alet, Brookfield viskometre ve Termostel olmak üzere 2 ana parçadan oluşmaktadır. Brookfield viskometre, bir motor, silindirik çubuk, kontrol tuşları ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Motor, çubuğun kendi eksenini etrafında dönmesini sağlayan kuvveti üretmekte ve şartnameye göre 20 devir/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Termostel sistemi ise, ısı kontrollü taşıyıcı, numune kabı ve sıcaklığı kontrol altında tutan bir parçadan oluşmaktadır. Numune kabı paslanmaz çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Isı kontrollü taşıyıcı, numune kabını içine almakta olup ısıtıcı elemanlara sahiptir. Bu elemanlarla deneyin 135°C'de uygulanması sağlanmaktadır.



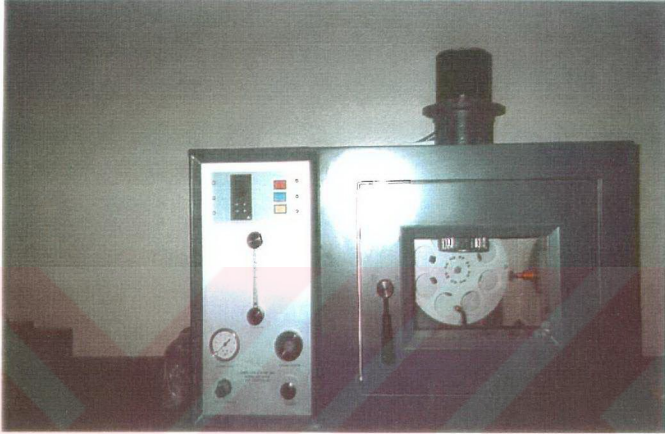
Şekil 6.1 Dönel viskozite

Dönel viskozite, sabit bir sıcaklıkta silindirik bir çubuğun asfalt numunesi içinde kendi eksenini etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Bu burulma kuvveti, viskozite tarafından otomatik olarak ölçülen asfalt viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu deney sonuçları ,karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının tahmininde kullanılan sıcaklık-viskozite tablosunun hazırlanmasında kullanılmaktadır.

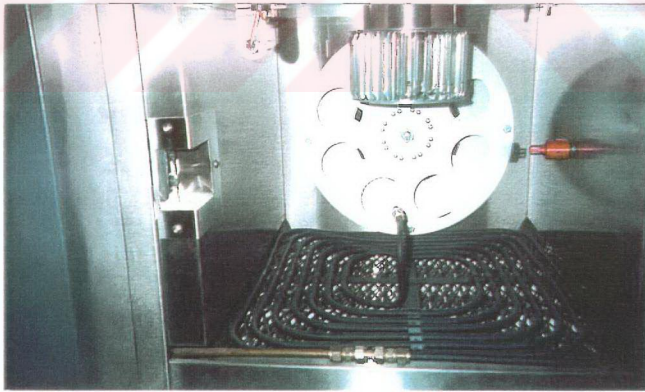
6.1.2 Döner İnce Film Etüvü (Rolling Thin Film Oven-RTFO)

Plentteki harmanlama ve karıştırma işlemi ile serim sırasında, yüksek sıcaklık ve hava akışı etkisi altında asfalt bağlayıcı yaşlanmaktadır (kısa dönem yaşlanma). Amerika Birleşik Devletleri'nde SHRP bünyesinde uygulamaya konulan SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements) asfalt şartnamesi bu olayı temsil eden Döner İnce Film Etüvü Deneyi'ni gerekli görmektedir (Asphalt Institute, Superpave Series No.1, 1996). Bu yöntemin amacı, işlem sırasında asfalt

içinde buharlaşan kütle miktarını saptamaktır. Etüv, dairesel bir taşıyıcıya sahiptir. Bu taşıyıcı düşey yönde yerleştirilmiş olup, kendi ekseninde dönebilmektedir. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te Döner İnce Film Etüv Aleti'nin genel görünüşleri verilmektedir.



Şekil 6.2 Döner ince film etüv aleti-genel görünüş



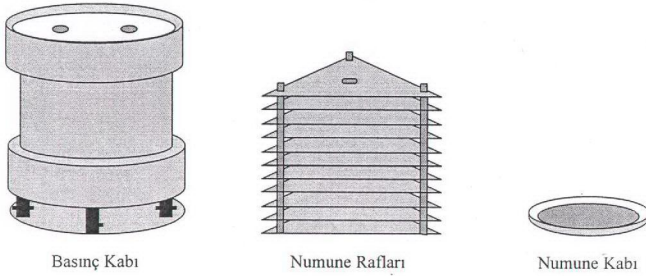
Şekil 6.3 Döner ince film etüv aleti-iklimlendirme haznesi

6.1.3 Basınçlı Oksidasyon Kabı (Pressure Aging Vessel-PAV)

Asfalt bağlayıcısının yolun servis ömrü boyunca maruz kaldığı etkileri (uzun dönem yaşlanma etkileri) temsil etmek amacı ile SHRP tarafından geliştirilen bir alettir. Basınçlı yaşlandırma aleti, basınçlı yaşlandırma kabı ve etüvden oluşmaktadır. Basınç kabı, 2070 kPa ve 90°C, 100°C ve 110°C gibi basınç ve sıcaklık koşullarında çalışacak şekilde tasarlanmış olup, içine 10 adet numune kabı alabilmektedir. Ayrıca basınç kabının içinde uygun bir raflı numune taşıyıcı ve yaşlanma süresi boyunca sıcaklığı $\pm 0.5^\circ\text{C}$ duyarlılık ile kontrol edilebilen dijital bir termometre bulunmaktadır (Asphalt Institute, Superpave Series No.1, 1996). Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te sırasıyla basınçlı yaşlandırma kabı genel görünüşü ve alete ait genel parçalar verilmektedir.



Şekil 6.4 Basınçlı yaşlandırma kabı genel görünüşü



Şekil 6.5 Basınçlı oksidasyon aleti genel parçaları

6.1.4 Dinamik Kesme Aleti (Dynamic Shear Rheometer-DSR)

Dinamik Kesme Aleti, bağlayıcı davranışının yükleme süresi ve sıcaklıkla ilişkisi dikkate alınarak SHRP tarafından geliştirilmiştir. Bu alet kullanılarak bitümlü bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ) gibi reolojik özellikleri ölçülmektedir. Bağlayıcı, biri sabit, diğeri sağa ve sola küçük salınım hareketleri yapan iki paralel plaka arasına yerleştirilmektedir (Şekil 6.6). Doğru numune kalınlığı bu iki plaka arasındaki boşluğun ayarlanmasıyla elde edilmektedir. Deneylerde boşluk yüksekliğine göre iki ayrı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve boşluk yükseklikleri bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilmektedir (RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda 1000 mikron boşluk ve 25 mm çaplı plaklar; PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda ise, 2000 mikronluk boşluk ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır).

Dinamik kesme deneyi, bitümlü bağlayıcıların kompleks modülünü ve faz açısını ölçerek hem viskoz hem de elastik davranışını belirlemektedir. G^* , sürekli tekrar eden kesme gerilmeleri altında oluşan deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. δ ise, viskoz ve elastik deformasyonun bağlı miktarlarının göstergesidir.

6.1.5 Asfalt Kiriş Eğilme Aleti (Bending Beam Rheometer-BBR)

Asfalt kiriş eğilme aleti, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıkta ve sabit yük altında gösterdiği sünme ve şekil değiştirme özelliklerini belirlemek amacı ile SHRP tarafından geliştirilmiştir.



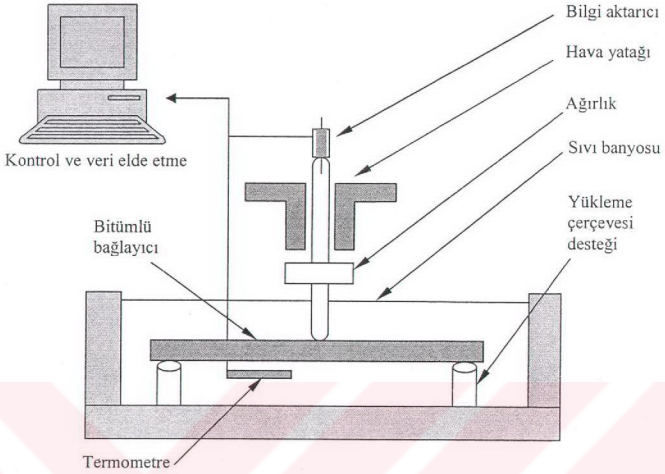
Şekil 6.6 Dinamik kayma reometresi

Bu deneyde RTFO veya PAV deneyleri ile yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Böylece bağlayıcının serme veya servis sırasındaki durumu temsil edilmiş olmaktadır.

Deney, yükleme çerçevesi, ısı kontrollü sıvı yatağı, bilgisayar ve veri elde etme sistemi parçalarından oluşmaktadır (Şekil 6.7). Küt uçlu ve ucunda ağırlık bulunan bir mil, basit destekli asfalt çubuğa ortasından yük uygulamakta ve elde edilen deformasyon değerleri bilgisayara aktarılmaktadır. Yük uygulamada kullanılan basınç pnomatik (hava) kaynaklıdır.

6.1.6 Superpave Yoğurmalı Presi (Superpave Gyratory Compactor)

Bu bölümde yoğurmalı presin tarihçesi ve piyasada bulunan mevcut yoğurmalı presler ile ilgili bilgiler verildikten sonra deneysel çalışmalarda kullanılan Superpave Yoğurmalı Pres Aleti ayrıntılı olarak tanıtılacaktır.



Şekil 6.7 Asfalt kiriş eğilme deneyi

6.1.6.1 Yoğurmalı Presin Tarihçesi

Yoğurmalı pres, 1930'lu yıllarda Teksas Yollar Departmanı (Texas Highway Department) tarafından imal edilmiştir. Orijinal sıkıştırma aletinde, iki paralel plaka arasına yerleştirilen, iç çapı 4 inç (100mm) olan kalıp kullanılarak sıkıştırma işlemi manuel olarak yapılmıştır. Plakalar, kalıp yüksekliğinin yaklaşık yarım inç (12,5 mm) açığına yerleştirilmiş, bu sayede alt ve üst plakaların köşegenleri birbirine temas edinceye kadar yaklaşık 6° lik bir eğilme açısı elde edilmiştir.

Düşey yük uygulamak için, baş aşağı yerleştirilen ve hidrolik bir kriko kullanılan sistemde, sıcak karışım içeren kalıp, paralel plakalar arasına yerleştirilerek iki uzun piston kolu ile sabitlenmiştir. Yoğurma işlemi, düşey basınç altında kalıbın karşıt iki köşesi plakalar ile temas edinceye kadar üç kez tekrarlanmıştır. Yoğurma boyunca numune üzerine uygulanan düşey basınç, eğilme açısı uygulanmadan önce basınç 50 psi'da tutulmuş, açı uygulandığında yükseltilmiş, üç adet yoğurma işlemi uygulandığında ise tekrar azaltılmıştır.

Eğilme açısı kalıp üzerinden kaldırıldıktan sonra, kalıbın düşey plaka üzerinde oturması sağlanmış ve hidrolik kriko ile sağlanan basınç 50 psi olarak ayarlanmıştır.

Bu işlem üç kez tekrar edilmiştir. Son aşamada 150 psi olarak uygulanan hidrolik basınç, 2500 psi'lık basınç değerine yükseltilerek sıkıştırma işlemi tamamlanmıştır.

1950'li yılların sonu ve 1960'lı yılların başında manuel sıkıştırma işlemi temsil eden mekanik sıkıştırmaya geçilmiştir. Bu işlem günümüzde de devam etmektedir.

İkinci yoğurmalı pres aleti, iri daneli agregalar kullanarak karışım yapmak amacı ile yine Teksas Yollar Departmanı tarafından imal edilmiştir. Bu alette, diğerinin aksine 6 inç (150mm)'lik kalıplar kullanılmış, yoğurma işlemi süresince düşey basınç sabit tutulmuştur (Huber, 1996).

II. Dünya Savaşı sırasında, ABD Ordusu İstihkam Sınıfı (The Corps of Engineers), askeri teknolojiyi sivil kullanıma adapte etme çalışmalarına başlamışlardır. Mississippi Yollar Departmanı (Mississippi Highway Department) tarafından havaalanları inşaatlarında kullanılmak üzere başlatılan Marshall karışım tasarımı, karayollarında da uygulanmaya başlamıştır. Aynı zamanlarda yoğurmalı pres ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yoğurmalı Pres Makinası (GTM-Gyratory Testing Machine) sıkıştırma işlemi boyunca uygulanan kuvvetleri ölçmek amacı ile imal edilmiştir. Teksas yöntemine kıyasla eğilme açısı uygulaması da değişmiştir. Teksas yönteminde, çap üzerinde üç noktada uygulanan eğilme açısı, bu yöntem ile ikiye indirilmiştir. Çap boyunca açının sabit tutulması, kalıba serbestçe dönebilme imkanı sağlamıştır. Bunun yanında sıkıştırma sırasında açı değişiminin kalıcı deformasyon performansını etkilediği ortaya çıkmıştır (Huber, 1996).

Bu çalışmalardan ilham alarak, Fransa'da 1958-1968 yılları arasında yoğurma-yoğunluk eğrilerini, agrega gradasyon etkilerini, mineral filler içeriğini ve karışımların sıkışabilirliğini etüt etmek amacıyla birkaç prototip yoğurmalı pres aleti imal edilmiştir. (Huber, 1996). 1968'de imal edilen ilk prototip, şantiyedeki sıkışmanın laboratuarda temsil edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu presle yapılan çalışmalar, formülasyonda tabii kum kullanımı, agrega mineralojisinin etkilerinin belirlenmesini de mümkün kılmuştur. 1970'den itibaren araştırmacıların gereksinimini karşılamak amacı ile piyasa tasarımları farklı, kaptörler (gerilme ve deformasyon ölçer) ile donatılmış presler çıkmaya başlamıştır (Yollar Milli Komitesi, 1997). Bonnot (1986) ve Moulter (1977), LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)'de halen kullanılmakta olan bir yöntem geliştirmişler ve PCG (Gyratory

Shear Compactor Press) adı verilen yoğurmalı pres aletini kullanarak bitümlü karışımların sıkışma performanslarını etüt etmişlerdir. Yoğurmalı presin Superpave'de kullanılması fikri NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) çerçevesinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Bu program dahilinde yürütülen çalışmada, karışımların sıkıştırma yöntemleri üzerinde durulmuş; ön karışım tasarımı ve SHRP'ın performansa dayalı test yöntemlerini kullanan analiz sistemi geliştirilmiştir (Cominsky ve diğ. 1998).

6.1.6.2 Piyasada Mevcut Yoğurmalı Presler

Halen piyasada mevcut presler Tablo.6.1'de sunulmaktadır (Yollar Milli Komitesi, 1997)

Tablo 6.1 Piyasada mevcut yoğurmalı presler (Yollar Türk Milli Komitesi, 1997)

Pres	Yapımcı Firma	Ülke
PCG III	Köprüler ve Yollar Merkez Lab.	Fransa
TROXLER	Troxler Electronic Lab Inc.	U.S.A.
SERVOPAC	Elle International	İngiltere
ICT-150	Invelop oy	Finlandiya
PINE	Pine Instruments	Avusturya
GYROPAC	Department of Transport. SA	Avustralya

6.1.6.3 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Superpave Yoğurmalı Presi

University of Maryland Yol Laboratuvarlarında sıcak karışım yapmak amacı ile TROXLER firması tarafından üretilen Troxler Model 4140 Yoğurmalı Pres aleti kullanılmıştır. Bu alet, özellikle Amerika'nın batı eyaletlerinde sıkça kullanılan bir sıkıştırıcıdır. Şekil 6.8'de Troxler Yoğurmalı Presi görülmektedir. Aletin açılabilir ve ayarlarına erişim için biri solda, diğeri ön tarafta olmak üzere 2 adet kapağı bulunmaktadır. Kullanıcı güvenliği için döner parçaların üstü, bu kapaklar ile kapatılmıştır. Kapakların yerine oturmaması durumunda sıkıştırma işlemi yapılamamaktadır. 4140 yoğurmalı pres modeli ile 100 mm ve 150 mm çapında asfalt numuneleri üretmek mümkün olabilmektedir. Kullanıcı, kalıbın dönme sayısını

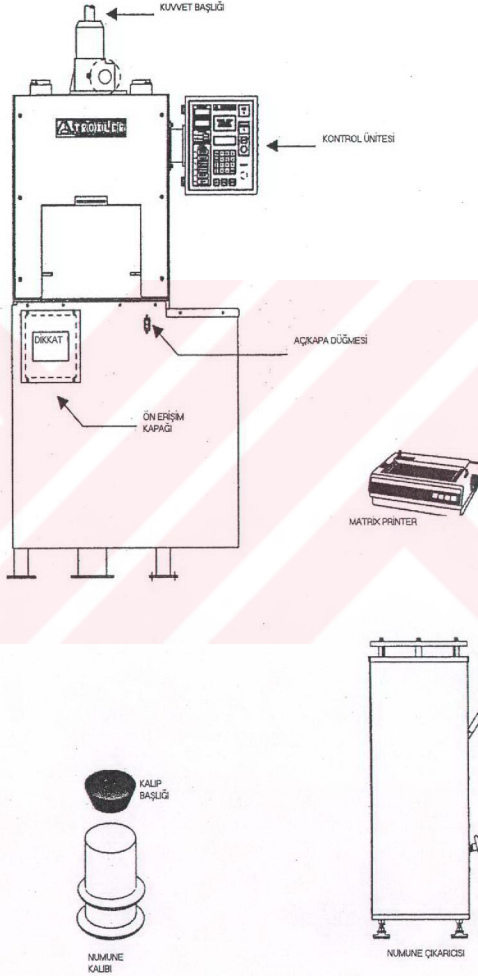
(jirasyonunu), sıkıştırma sonundaki numune yüksekliğini, sıkıştırma basıncını önceden saptayabilmektedir. Ayrıca, önceden dönme açısı 0.5° ile 2.0° arasında değişen değerlerde ayarlanabilmektedir. Pres, otomatik veya manuel sıkıştırma yapabilmektedir. Otomatik sıkıştırma yalnızca tek bir tuşa dokunarak yapılabilir, manuel sıkıştırma ise sıkıştırmanın her bir aşaması kontrol edilebilmektedir. Otomatik sıkıştırma sırasında, kalıp dönme sayısına bağlı olarak numune yüksekliği ve/veya basınç değerleri yazıcıya seri kablo aracılığı ile gönderilebilmektedir.



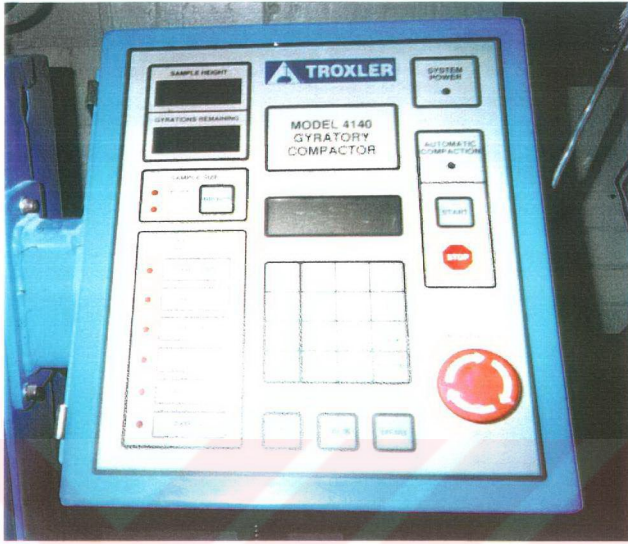
Şekil 6.8 Troxler yağurmalı Presi model No:4140

Şekil 6.9'da yağurmalı pres aletine ait ana parçaların şekilleri verilmektedir. Parçaların genel işlevleri ayrıntılı olarak aşağıda açıklanmaktadır.

-Kontrol Ünitesi, sıkıştırıcının sağ üst köşesinde yer almaktadır. Uygulama ile ilgili işlemler bu ünite ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 6.10). Tablo 6.2’de kontrol panelinde yer alan bölümlerin isimleri ve özellikleri verilmektedir.



Şekil 6.9 Troxler Yoğurmalı Presine ait parçalar



Şekil 6.10 Troxler Yoğurmalı Presi-kontrol ünitesi

-Numune kalıbı, asfalt numunelerinin hazırlanması için kullanılmaktadır. 100 mm ve 150 mm çapında olan kalıplar, aşınmaya dayanıklı sert çelikten imal edilmişlerdir (Şekil 6.11).

-Kalıp Başlığı, kalıp içine konulan karışımın üstüne yerleştirilmektedir. 100 veya 150 mm çapındadırlar.

-Numune Çıkarıcısı, sıkıştırılan numunenin kalıptan çıkartılmasını sağlamaktadır.

-Matriks Yazıcı, sıkıştırma sırasında veya sonrasında hafızaya alınan verilerin yazılı dökümünü almaktadır. Bu işlem için yazıcı ile sıkıştırıcı arasında seri kabloya ihtiyaç vardır.

-Performans Tanımlama Aleti, basınç ve açı ayarlanması için kullanılmaktadır.

Yoğurmalı pres aleti kullanılarak numune hazırlanışına ilişkin ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Tablo 6.2 Kontrol ünitesine ait tuşlar ve işlevleri

Kontrol Ünitesindeki Tuşlar	Fonksiyon
<EMERGENCY>	Bu acil durum tuşudur. Sıkışma sırasında olağandışı bir durum ile karşılaşıldığında işlemi durdurur ve kuvveti ortadan kaldırır.
<ESC>	Herhangi bir veri kaydı yapılmadan ana menüye döner.
<CALIB>	Kalibrasyon menüsüne erişimi sağlar. Kullanıcı bu menüyü kullanarak basınç, yükseklik, jirasyon açısı ve dönüş hızının kalibrasyonlarını yapabilmektedir.
<MENU>	Bu tuş ile kullanıcı menü seçeneklerine erişebilmektedir. Bu seçenekler: elde edilen verilerin yazıcıdan alınabildiği yazıcı seçeneği; basınç, dönüş sayısının ayarlanabildiği set up seçeneği, spesifik dönem sayısına veya numune yüksekliğine göre sıkıştırma sağlayan mode seçeneği; uygulamanın yapılma zamanı ve süresi seçenekleri.
<SELECT>	Sıkıştırmada kullanılan 100 mm veya 150 mm kalıpların seçiminde kullanılan tuştur.
<START>	Otomatik sıkıştırmaya başlama tuşudur.
<STOP>	Sıkıştırmayı durdurmak için kullanılmaktadır.
<RAM DOWN>	Asfalt numunesi üzerine kuvvet kolunun inmesini sağlamaktadır.
<ANGLE ON>	Dönüş açısının uygulanmaya başlatılması için kullanılmaktadır.
<GYRATION ON>	Asfalt numunesinin dönüşünü (jirasyonunu) başlatmaktadır.
<GYRATION OFF>	Asfalt numunesinin dönüşünü (jirasyonunu) durdurmaktadır.
<RAM UP>	Kuvvet kolunun numunenin üzerinden ayrılmasını sağlamaktadır.
<YES/NO>	Kontrol panelinden kullanıcıya sorulan soruların cevaplandırılması için kullanılmaktadır.
<↑>,<↓>	Menüler arasında geçiş sağlar.

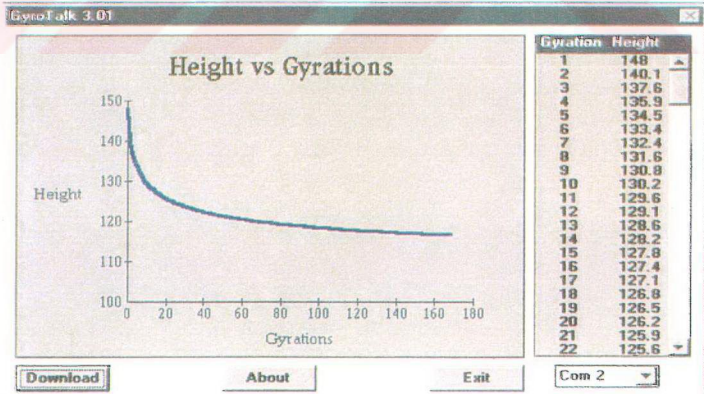


Şekil 6.11 Troxler Yoğurtmalı Presinde kullanılan kalıplar

6.1.6.4 Superpave Yoğurtmalı Presi'ne ait Bilgisayar P rogramı

Troxler Firması sıkıştırıcı ile birlikte kullanılmak üzere bir visual basic yazılım programı geliştirmiştir. Bu programın amacı:

- Sıkıştırma işlemi yaparken veya sıkıştırma sonrasında yoğurtmalı pres aletinden, gerekli verileri almak,
- Karışım tasarımı hesaplamalarını gerçekleştirmek.



Şekil 6.12 Troxler Yoğurtmalı Presine ait gyrotalk programı

Şekil 6.12'de yağurmalı pres aleti ile birlikte kullanılan Gyrotalk bilgisayar programının bir parçası görülmektedir. Program iki şekilde işlemektedir.

1-Sıkıştırma sırasında verilerin sıkıştırıcıdan alınımı-real time veri;

2-Sıkıştırma işleminden sonra verilerin alınımı-stored veridir.

Verilerin gyrotalk'a yüklenmesinden sonra, numune dönme sayısına bağlı yükseklik değerleri ve bu değerlere ait grafik çizimi ayrıntılarıyla ekrandan görülebilmektedir.

Şekil 6.13, 6.14 ve 6.15'te GyroPave 2000 programının bölümleri görülmektedir. Bu program Superpave sıcak karışım tasarımı yapmaktadır. GyroTalk programından gerekli verilerin (numune yüksekliği-dönme sayısı) GyroPave 2000 programına yüklenmesinden sonra, numuneye ait hacim özgül ağırlık, teorik maksimum özgül ağırlık, malzeme özellikleri (agrega gradasyonu, agreganın efektif özgül ağırlığı) ve kullanılan asfalt yüzdesi değerleri de programa yüklenmektedir.

Tasarım sonuçları program tarafından otomatik olarak yapılmakta sonuçlar ve ilgili grafiklerle ayrı bir sayfada yer almaktadır (Şekil 6.15).

The screenshot displays the GyroPave 2000 software interface within a Microsoft Excel environment. The interface is divided into several sections for data entry and calculation.

Sample Buttons Section: Contains radio buttons for selecting sample types: Sample 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 3c, 4a, 4b, 4c, and 4d. A "Reload Start Menu" button is also present.

Input Fields: Includes fields for "Gb" (set to 1.03) and "Clear Height Data".

Sample Data Tables: Two tables are shown, one for Sample 1a and one for Sample 2a. Each table includes columns for Sample, Weight, Final Gmb, Ps, Gse, P0.075, Gsh, Gmm(Rice), and Ph(AC).

Height and Gmm Data Table: A table with columns for N, 1a, 1b, 1c, Height Average, and Gmm Average. It contains data for samples 1 through 7.

Sample Data Table (Right): A table with columns for Sample, Weight, Final Gmb, Ps, Gse, P0.075, Gsh, Gmm(Rice), and Ph(AC). It contains data for samples 1 through 7.

Status Bar: At the bottom, it shows "Ready" and "NUM".

Şekil 6.13 GyroPave 2000 Superpave sıcak karışım tasarımı çalışma sayfası

Microsoft Excel - GPave 2000 Nmax.xls

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

819

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2									
3									
4									
5		Sample Results							
6			Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4			
7		%Gmm(N-Initial)	93.2	88.3	89.8	87.7			
8		%Gmm(N-Design)	102.6	97.0	98.8	96.1			
9		%Gmm(N-Maximum)	103.8	97.9	99.8	96.9			
10		%Air Voids(N-Design)	-2.6	3.0	1.2	3.9			
11		%VMA(N-Design)	4.40	9.39	9.76	11.09			
12		%VFA(N-Design)	159.52	88.06	87.21	84.83			
13		Estimated Results At Target Air Voids (4% at N-Design)							
14			Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4			
15		Pb(Est.)	2.83	4.90	4.18	5.33			
16		%VMA(Est. @ N-Design)	5.08	9.49	10.04	11.10			
17		%VFA(Est. @ N-Design)	21.02	57.83	80.18	83.97			
18		%Gmm(Est. @ N-Initial)	88.81	87.34	87.10	87.83			
19		%Gmm(Est. @ N-Maximum)	97.03	96.94	97.01	96.85			
20		Pbe	2.10	4.35	3.84	4.71			
21		DP	4.40	1.84	4.98	0.90			
22									
23									
24									

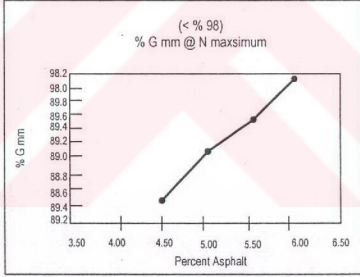
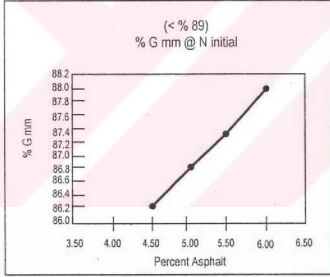
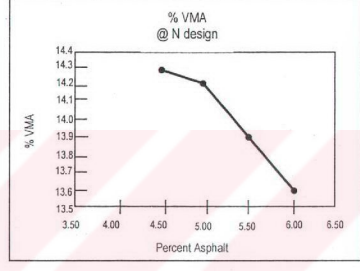
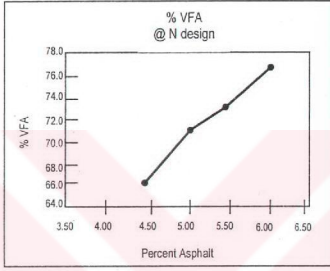
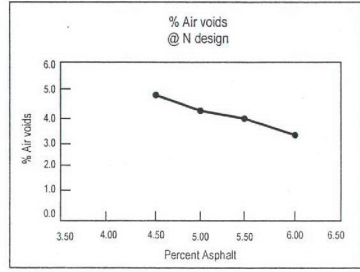
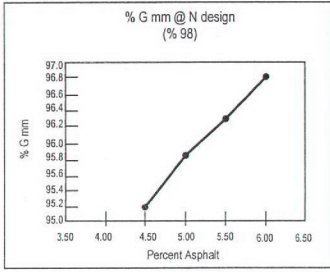
Ready

NUM

Şekil 6.14 GyroPave 2000 Superpave sıcak karışım tasarımı sonuç sayfası

6.1.7 MTS (Material Testing System) Aleti

Bu alet, tekrarlanan yük ile indirekt çekme deneyini kullanarak laboratuarda yoğunmalı pres aleti ile hazırlanmış bitümlü karışım numunelerinin esneklik modüllerinin (resilient modülüs) saptanması amacıyla MTS System Corp. tarafından imal edilmiştir ve kapalı devre elektro-hidrolik bir sisteme sahiptir. Sıcaklık, yük, yükleme frekansı ve yükleme süresi işlemleri içeren esneklik modülü deneyi değerleri, üst yapı tasarımı veya üstyapı analizi için bilgi vermesinin yanısıra, malzemelerin birbirlerine göre kalitesinin değerlendirilmesini sağlar. İşlemlerin örseleme özelliği olmadığı için, bir numune üzerinde sıcaklık veya nem şartları değiştirilerek deney tekrarlanabilmektedir. Bu deneye ilişkin ayrıntılı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir.



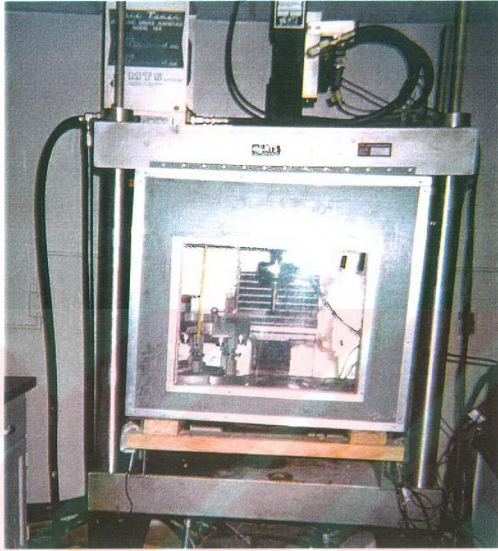
Şekil 6.15 GyroPave 2000 Superpave sıcak karışım tasarımı sonuç grafikleri

Aşağıda laboratuarda kullanılan aletin parçaları ve işlevleri verilmektedir.

-Sıcaklık Kontrol Kabini

Kabin, sıcaklığı 5-40°C (41-104°F) aralıkta ve belirlenen sıcaklığı $\pm 1.1^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ\text{F}$) limitlerinde kontrol edebilecek, en az üç numuneyi deney öncesinde 24 saat tutabilecek genişliğe sahiptir.

Birçok sistemde olduğu gibi bu sistemde de kabini soğutmak için karbondioksit (CO_2), ısıtmak içinde elektrikli ısıtıcılar kullanılmaktadır. Şekil 6.16'da sıcaklık kontrol kabini görülmektedir.



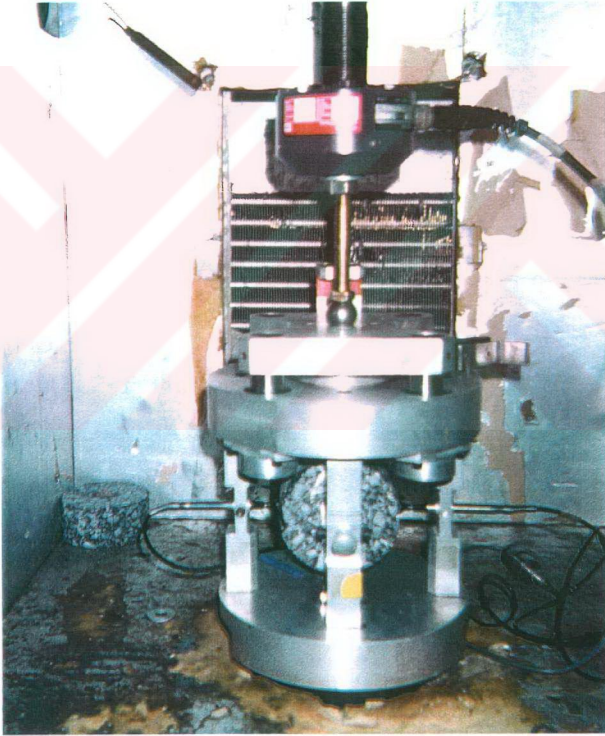
Şekil 6.16 Sıcaklık kontrol kabini

-Yüklemeye Çerçevesi ve Diferansiyel Transdüser

Laboratuarda hazırlanan numuneler üzerine esneklik modülü deneyi uygulamak amacı ile Gilson Company, Inc. tarafından üretilen yüklemeye çerçevesi kullanılmıştır. Baladi çerçevesi (Baladi Device) adı verilen bu çerçeve, aşırı yüklemelere dayanabilecek sertlikte imal edilmiş olup, uygulanan yük altında paralellliğini koruyacak silindirik alt ve hareketli üst plakalar ve bu plakaları taşıyacak sabit dört kolondan oluşmaktadır. Yük, üst plakada açılmış bir delik üzerine yerleştirilmiş standart 1 inç (25,4mm) çapında çelik bilye aracılığı ile uygulanmaktadır (Barksdale ve diğ., 1998). Çerçevenin içine numunenin kolayca yerleştirilebilmesi için kauçuk kullanılmasına karşın, numunenin bu çerçeve içinde düzenlenmesi oldukça zordur (Şekil 6.17).

Yükü numuneye uygulamak için, eğrilik yarıçapı, deney numunesinin nominal yarıçapına eşit konkav yüzeyli metal yükleme şeritleri kullanılmıştır. Deney sırasında numunenin kesilmemesi için keskin kenarlar yuvarlatılmıştır.

Yükleme çerçevesinin her iki yanına ve üstüne, birer delik aracılığı ile yatay ve düşey deformasyon değerlerini ölçmek için lineer değişkenli diferansiyel transdüserler (LVDT) bağlanmıştır. Çalışmalarda Trans-Tek tarafından imal edilmiş AC (alternatif akımlı-alternating current) ve DC (direkt akımlı-direct current) transdüserler kullanılmıştır. LVDT'ler numune yüksekliğinin ortasında yatay çap üzerinde karşılıklı ve birbirlerine paralel olarak yerleştirilmişlerdir (Şekil 6.18).



Şekil 6.17 Yüklem çerçevesi



Şekil 6.18 Yatay ve düşey LVDT

-MTS Kontrol Paneli

Değişik frekans, yükleme zamanı ve yük değerlerinde yük uygulama amacı ile yine MTS Systems Corp. tarafından üretilmiş- MTS Kontrol Paneli kullanılmıştır. Bu aletin genel görünüşü Şekil 6.19’da verilmektedir.



Şekil 6.19 MTS kontrol paneli

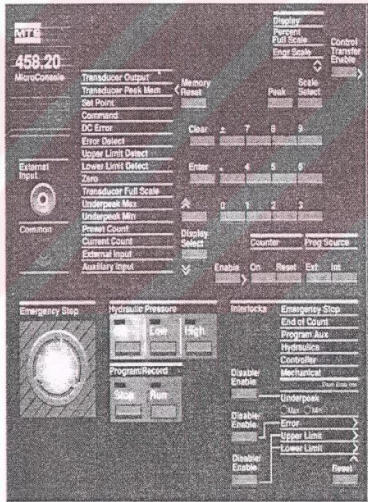
Panel üç bölümden oluşmaktadır:

- Mikro-Konsol
- Mikro-Profil
- AC-DC Kontrol

Mikro-konsol, panelin ana bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 6.20). Bu panel aracılığı ile;

- Deney sırasında uygulanan yükün şiddetinin ve devir sayısının kontrolü,
- Yükün alt ve üst limitlerinin kontrolü ve ayarlanması,
- Deney sırasında karşılaşılabilecek mekanik veya hidrolik problemlere karşı uyarı sistemlerinin kontrolü,
- Programlanan deneyi başlatma veya bitirme işlemleri,
- Hidrolik basıncın (düşük/yüksek) ayarlanması

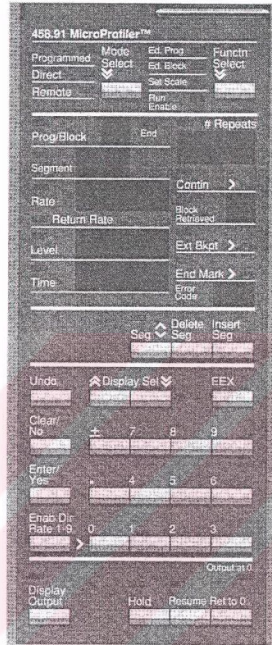
sağlanabilmektedir.



Şekil 6.20 Mikro-konsol

Mikro-profil aracılığı ile laboratuarda hazırlanan numune üzerine, homojen deformasyon okuması elde edilebilecek yeterlikte, belirli bir periyotta, darbe etkisi oluşturmadan uygun program yazılabilmektedir. Numunelerin elastik davranışlarını tespit edebilmek için haversin tipi dalga formu uygulanmıştır (Deneyin uygulandığı ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümlerde verilecektir). Program, çeşitli segmentler ve

bloklardan oluşmaktadır. Dalga formuna ait frekans ayarları da mikro-profil yardımı ile yapılmaktadır (Şekil 6.21).

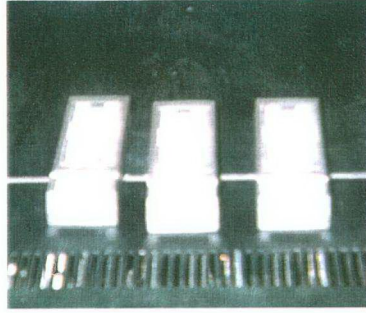


Şekil 6.21 Mikro-profil

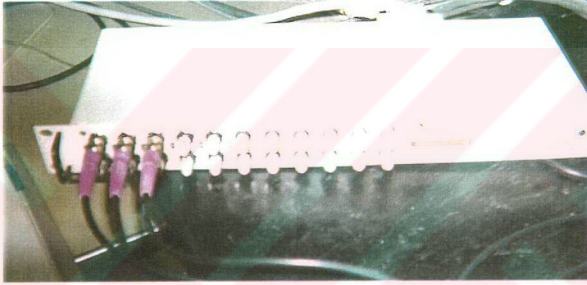
AC-DC panelinde ise, yük hücreleri aracılığı ile uygulanan yüke bağlı deformasyonları ölçmek için kullanılan LVDT'lerin kalibrasyonu yapılmaktadır. Mikro-profilinden uygun veri transferinin yapılabilmesi için bu ayarlama büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu panelde, yük hücresinin kapasitesine ve LVDT'lerin uygulama menziline göre çeşitli yük kartuşları kullanılmaktadır (Şekil 6.22).

-Veri İletim Sistemi (Veri Acquisition System) ve Labview Programı

MTS aletinden elde edilen verilerin, bilgisayara aktarılması için veri iletim sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, AT-MIO-16 Board adı verilen bir kasadan oluşmaktadır (Şekil 6.23).



Şekil 6.22 Yük ve LVDT kartaşları



Şekil 6.23 Veri iletim sistemi (MIO-16 Board)

MIO-16, yüksek performanslı, çok fonksiyonlu, analog-dijital bir kasa olup sistemin amacı, yük hücresi ve lineer değişken dirençli transdüserlerden alınan analog volt sinyallerini dijital volt sinyallerine dönüştürmektir. Başka bir ifade ile, yük hücresi ve LVDT'lerden deney sırasında elde edilen veriler, kullanıcının anlayabileceği -10V ile +10V arasında çalışılabilmeye olanak veren değerlere dönüşmektedir.

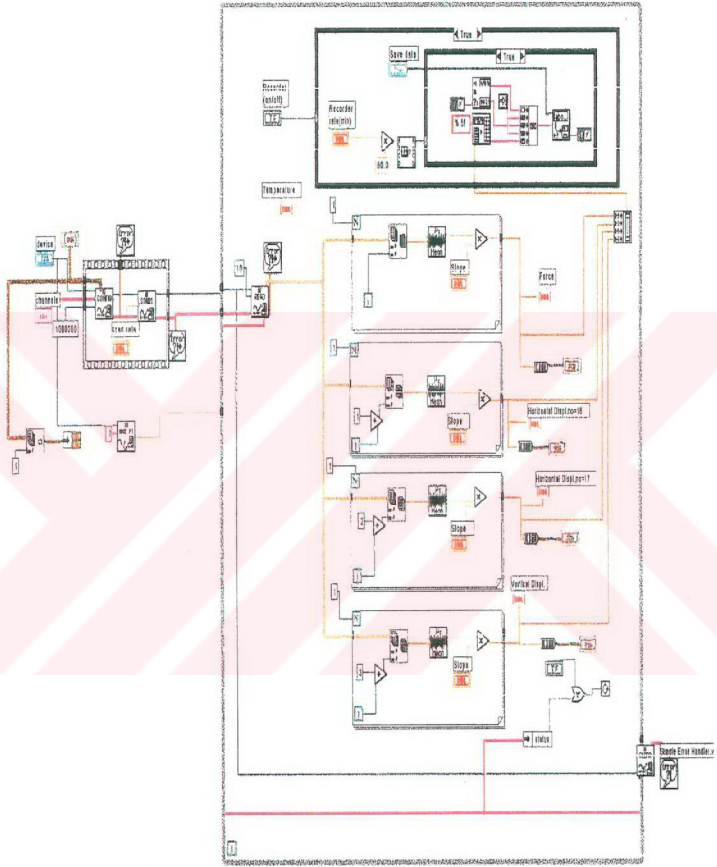
Bu sistem, 0,00001 inç (0,00025 mm) aralıklarda yatay deformasyonu ölçebilecek kapasitededir. Bu sistem aracılığı ile bilgisayara aktarılan verilerin uygun metrik sisteme çevrilmesi, kaydedilmesi ve bu yeni sistem üzerinde çalışma ve yorumlama işlemleri, National Instruments tarafından geliştirilen LabView programı ile yapılmaktadır. Bu program Quick Basic programlama dili ile yazılmıştır (Şekil 6.24, Şekil 6.25).



Şekil 6.24 Lab View ana sayfası

Şekil 6.24'te programa ait ana sayfa görülmektedir. Sayfanın sol bölümünde; MTS kontrol panelinin veri iletim sistemi aracılığı ile gönderdiği veriler görülmektedir. Bu bölümden, deney sırasında yük, yatay ve düşey deformasyon değerleri grafik olarak alınabilmektedir. Sağ bölümde ise aynı değerlerin sayısal değerleri görülmektedir. Veri iletim sistemi tarafından bilgisayara volt cinsinden gönderilen veriler, bu bölümde metrik sisteme veya SI sistemine çevrilmektedir. Deneye başlamadan önce LVDT kalibrasyon panelleri ve yük kalibrasyon halkası kullanılarak volt okumalarına bağlı olarak deformasyon (μm) ve yük (kg) grafikleri çizilmektedir. Linear grafiklerden elde edilen eğim değerleri bu bölümde "slope" kısmına yazılmaktadır. Ana sayfanın en üst bölümünde ise verilerin kaydedilmesi için "recorder" tuşları bulunmaktadır. Elde edilen bütün verilen "txt" dosyası olarak kaydedilmektedir.

Burak vert.vi
C:\TEMP\Burak vert.vi
Last modified on 5/3/01 at 6:42 PM
Printed on 5/4/01 at 12:00 PM



Şekil 6.25 LabView çalışma program düzeniği

Şekil 6.25'te ise ana sayfaya ilişkin çalışma düzeniği görülmektedir. Verilerin hangi düzende, hangi saat ve zaman aralığında, hangi dosyaya kaydedileceği bu bölüm ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca kullanılan LVDT sayısına göre programın modifikasyonu mümkündür.

6.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Uygulanan Deneyler

Bu bölümde, agregâ, bitümlü bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışımlar üzerine bölüm 6.1’de ayrıntılı olarak tanıtılan deney aletleri ile uygulanan deney yöntemleri ve ilgili standartlar anlatılacaktır.

6.2.1 Agregâ ve Uygulanan Deneyler

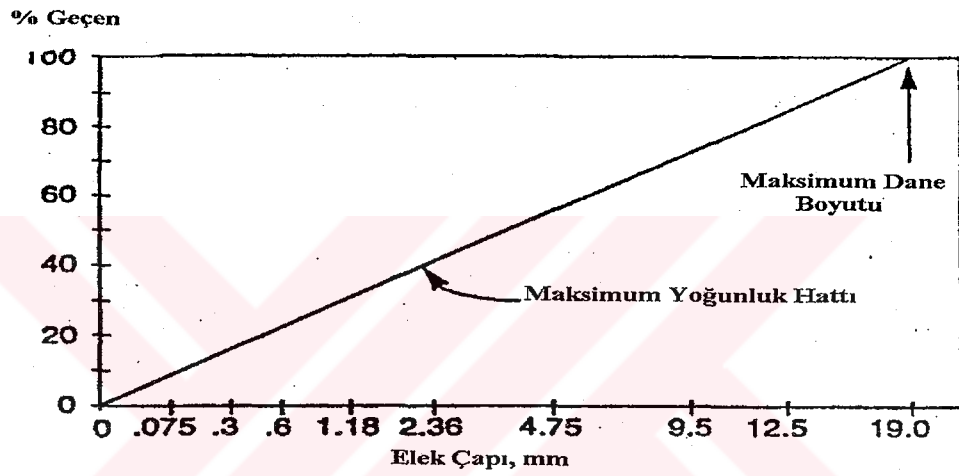
Deneyisel çalışmalarda kullanılan agregânın özelliklerini belirlemek amacı agregâ grupları üzerine ilk olarak özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sağlamlık, kum eşdeğerlik, köşelilik, kırılma oranı ve yassılık indeksi deneyleri uygulandıktan sonra elek analizi işlemine geçilmiş ve uygun gradasyon saptanmıştır. Superpave karışımlarında agregâ cinsi olarak Redland Genstar firmasına ait Frederick Taşocağı’ndan temin edilen kireçtaşı kullanılmış olup, agregalar 7#, 8#, 10# ve yıkanmış 10# olmak üzere dört gruba ayrılmıştır.

Elek analizi deneyi, özellikle agregâ olarak kullanılacak malzemelerin gradasyonunun saptanması için kullanılmaktadır. Sonuçlar, dane boyutu dağılımının şartnameler ile uygunluğunu saptamak ve çeşitli agregâ ya da karışım üretiminin kontrolündeki gerekli bilgiyi oluşturmak için kullanılmaktadır.

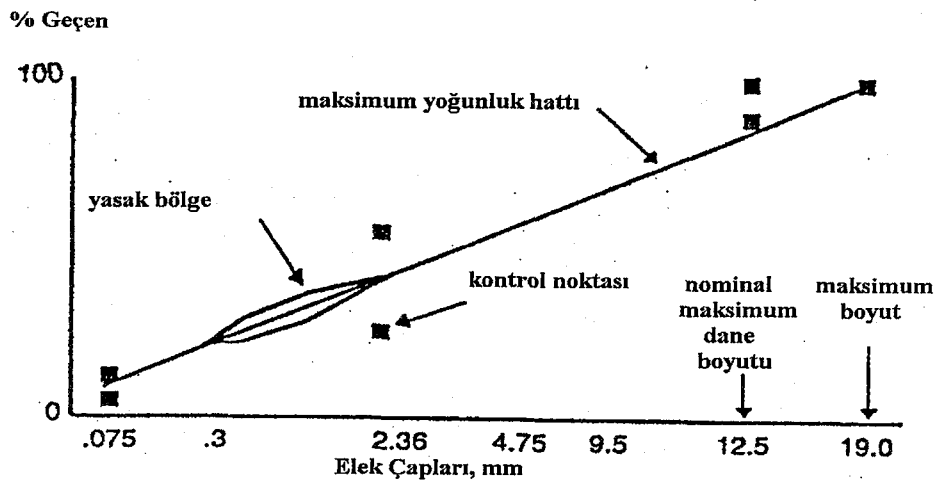
Superpave, gradasyonun saptanmasında 0.45 üslü gradasyon grafiğı (0.45 power gradation chart) kullanılmaktadır. Grafiğın düşey ekseninde yüzde geçen miktarı; yatay ekseninde ise 0.45 üslü elek çapları milimetre cinsinden verilmektedir. Bu grafiğın en önemli özelliğı, maksimum yoğunluk hattıdır. Orijin noktası ile maksimum dane boyutu arasında çizilen düz çizgiden oluşan bu hat, danelerin en fazla sıklıkta birbirlerine yaklaştığı durum olarak ifade edilebilir (Şekil 6.26).

Superpave, 0.45 üslü gradasyon grafiğine iki önemli özellik daha kazandırmıştır: Kontrol noktaları ve yasak bölge (Şekil 6.27). Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin aralarından geçmek zorunda olduğu noktalardır. Bu noktalar; en küçük dane boyutu (0.075 mm), 2.36 mm elek çapına karşılık gelen dane boyutu, nominal maksimum dane boyutu (%10’dan fazla malzemenin üzerinde kaldığı elek numarasının bir üstündeki elek numarasına karşılık gelen dane boyutu) ve maksimum dane boyutu

(karışım da tüm agrega danelerinin üzerinden geçtiği elek numarasına karşılık gelen dane boyutu) üzerindeki noktalardır. Yasak bölge, gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bir bölgedir. Bu bölgeden geçen eğriye, şeklinden dolayı tümsek gradasyon (humped gradation) adı verilmektedir. Bu çeşit gradasyon, karışım da fazla kum oranının ve/veya toplam kum oranına göre çok fazla ince kum varlığının bir göstergesidir. Bununla birlikte tümsek gradasyon kullanılarak inşa edilen yollarda sıkıştırma problemleri ve yolun servis ömrü boyunca oluşacak deformasyonlara karşı direnç azalmasından kaynaklanan birtakım problemler görülmektedir (Asphalt Institute Superpave Series No:2, 1996).



Şekil 6.26 19 mm maksimum dane boyutu için maksimum yoğunluk hattı (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)



Şekil 6.27 Superpave gradasyon limitleri (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Tablo 6.3 ve 6.4'te nominal maksimum dane boyutuna göre kontrol noktaları ve yasak bölgeye ilişkin Superpave gradasyon limitleri verilmektedir (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996).

Tablo.6.3 Nominal maksimum dane boyutuna ilişkin kontrol bölgesi limit değerleri
(Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Nominal Max. Dane	ELEK NO	%GEÇEN(min)	%GEÇEN(max)
12,5mm	0.075mm	2	10
	2.36mm	28	58
	12.5mm	90	100
19mm	0.075mm	2	8
	2.36mm	23	49
	19mm	90	100
37,5mm	0.075mm	0	6
	2.36mm	15	41
	37.5mm	90	100

Tablo.6.4 Nominal maksimum dane boyutuna ilişkin yasak bölge limit değerleri
(Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996)

Nominal Max. Dane	ELEK NO	%GEÇEN(min)	%GEÇEN(max)
12,5mm	2.36mm	39.1	39.1
	1.18mm	25.6	31.6
	0.6mm	19.1	23.1
	0.3mm	15.5	15.5
19mm	2.36mm	34.6	34.6
	1.18mm	22.3	28.3
	0.6mm	16.7	20.7
	0.3mm	13.7	13.7
37,5mm	2.36mm	23.3	27.3
	1.18mm	15.5	21.5
	0.6mm	11.7	15.7
	0.3mm	10	10

Agrega grupları üzerine uygulanan özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sağlamlık, kum eşdeğerlik, köşelilik, kırılma oranı ve yassılık indeksi deneylerinin sonuçları, yararlanılan şartname ve sınır değerleri Tablo 6.5'te verilmektedir.

Tablo 6.5 Agreg a grupları üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları

Test	7#	8#	10#	Yıkanmış 10#	Yararlanılan Şartname	Şartname Sınırları
Hacim Özgül Ağırlık	2.701	2.700	2.586	2.663	AASHTO T84/T85	-
Yaş Özgül Ağırlık	2.717	2.710	2.646	2.687	AASHTO T84/T85	-
Zahiri Özgül Ağırlık	2.736	2.730	2.729	2.729	AASHTO T84/T85	-
Absorbsiyon yüzdesi	0.4	0.4	0.9	0.9	AASHTO T84/T85	-
Los Angeles Aşınma yüzdesi	26	26	-	-	AASHTO T96	%45 (maksimum)
Sağlamlık yüzdesi	0.1	0.1	1.2	1.2	AASHTO T104	%10-20 (maksimum)
Köşelilik	-	-	45.6	45.6	AASHTO TP33	%40 (minimum)
Kırılmışlık Oranı	100	100	100	100	PTM 621	-
Kum Eşdeğerlik Katsayısı	-	-	89	89	AASHTO T176	%40 (minimum)
Yassılık İndeksi	7.5	9.7	-	-	ASTM D4791	%10 (maksimum)

Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Superpave'in öngördüğü şartname koşullarını sağlamaktadır.

Agrega özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneyler uygulandıktan sonra, elek analizi deneyi (ASTM C136/AASHTO T27) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.6'da verilmektedir.

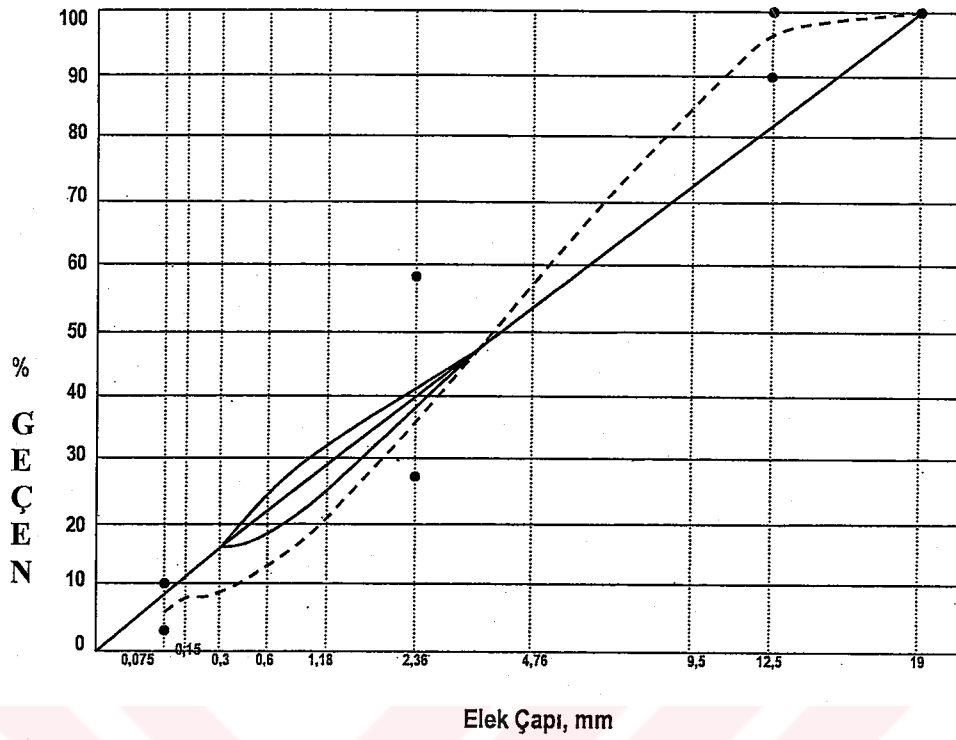
Tablo 6.6 Elek analizi deneyi sonuçları

Test	7#	8#	10#	Yıkanmış 10#
<i>Elek No</i>		-	-	-
19.0 mm	100	-	-	-
12.5 mm	90.4	100	-	-
9.5 mm	63.7	93.7	100	100
4.75 mm	12.5	18.6	93.3	92.2
2.36 mm	2.7	3.2	62.9	59.1
1.18 mm	-	1.3	39.1	31.7
0.600 mm	-	-	26.7	17.4
0.300 mm	-	-	19.4	9.5
0.150 mm	-	-	15.2	5.2
0.075 mm	-	-	12.4	3.7

12,5 mm nominal maksimum dane boyutu için, Superpave'in öngördüğü kontrol noktaları ve yasak bölge dikkate alınarak karışım oranları belirlenmiştir. Bu oranlar sırası ile 7#; 8# 10# ve yıkanmış 10# için %28, %15, %17 ve %40'tır. Aşağıda, belirlenen oranlar kullanılarak hazırlanan sıcak karışımlara ilişkin gradasyon değerleri ve eğrisi verilmektedir (Tablo 6.7 ve Şekil 6.28).

Tablo 6.7 Sıcak karışımlarda kullanılacak gradasyon değerleri

Elek No	%Geçen
19.0 mm	100
12.5 mm	97
9.5 mm	87
4.75 mm	58
2.36 mm	35
1.18 mm	21
0.600 mm	13
0.300 mm	9
0.150 mm	8
0.075 mm	6.1



Şekil 6.28 12,5 mm dane boyutu için yasak bölge, kontrol noktaları ve gradasyon eğrisi (Witczak, 1999)

6.2.2 Bitümlü Bağlayıcı ve Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcı olarak CITGO Refining Company-Poulsboro'dan temin edilmiş PG 64-22 performans dereceli (performance graded) modifiye edilmemiş bağlayıcı kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcı üzerine özgül ağırlık ve dönel viskozite deneylerinden sonra, Superpave karışım tasarımında gerekli görüldüğü üzere kısa dönem yaşlanma, ardından da uzun dönem yaşlanma deneyleri uygulandıktan sonra hem orijinal bağlayıcı hem de RTFO ve PAV kalıntısı üzerine Dinamik Kesme ve Asfalt Kiriş Eğilme deneyleri uygulanmıştır.

6.2.2.1 Dönel Viskozite Deneyi (ASTM D4402/AASHTOTP 48)

Bu deney, bağlayıcının sıcak karışım tesisinde pompalanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. İlk olarak bağlayıcı için uygun bir silindirik çubuk seçilmiştir. Dönel viskozite, bu silindirik çubuğun sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir.

Etüvde 150°C'nin üzerinde olmamak şartıyla 30 gr asfalt, sıvı hale gelinceye kadar ısıtılmış ve belli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabı ile tartılmıştır (Numune ağırlığı, silindirik çubuğun boyutuna göre 8-11 gr arasında değişmektedir). İçinde asfalt bulunan numune kabı, önceden belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış ısı kontrollü bir taşıyıcının üstüne, ardında da silindirik çubuk, numune içine yerleştirildikten sonra viskometreye takılmıştır. 135°C'lik uniform bir sıcaklığa ulaşıncaya kadar yaklaşık 15 dakika beklenmiş, bu süre boyunca motor çalıştırılmış, viskozite ve dönme oranı gözlenmiştir. Numune sıcaklığı dengeli duruma geldiğine ve viskozite okumaları sabitleşmeye başladığında deney ile ilgili bilgiler (deney sıcaklığı, viskozite, deney numarası ve dönüş sayısı) dijital göstergeden alınmıştır. Bir dakika ara ile üç viskozite okuması yapılmış ve okumaların ortalamaları alınmıştır.

6.2.2.2 Döner İnce Film Etüvü Deneyi (ASTM D2872/ASHTO T240)

Bu yöntem iki amaca hizmet etmektedir. Bunlardan biri asfalt üzerinde bu işlemten sonra uygulanacak deneylere belli ölçüde yaşlanmış numune temin etmek, diğeri ise bu işlem sırasında asfalt içinde buharlaşan kütle miktarını saptamaktır. Buharlaşan kütle miktarı, asfaltın, karıştırma ve serme işlemleri sırasında oluşabilecek yaşlanmasının bir göstergesidir.

Deney aletlerinin tanıtımı bölümünde sözedildiği gibi, bu deney için özel olarak imal edilmiş etüv kullanılmıştır. Etüv, düşey ve kendi eksenini etrafında dönen bir taşıyıcıya sahiptir. Taşıyıcının içine yatay olarak 8 adet şişe yerleştirilmiştir. Şişeler, taşıyıcı ile birlikte dönerken en alt konuma geldiklerinde hava üfleyici parça ile her bir şişenin içerisine hava püskürtülmektedir. Şişelerin ikisi kütle kaybının belirlenmesinde, diğerleri ise basınçlı oksidasyon kabı deneyinde kullanılmaktadır.

Etüv kullanılmadan önce 6 saat boyunca uygulama sıcaklığı olan 163°C'ye kadar ısıtılmıştır. Asfalt numuneleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra yaklaşık 10 dakika içinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde termostat ayarlanmıştır.

Deneyde asfalt, 150°C'yi geçmeyecek şekilde ısıtılmış ve her bir şişeye 35 gram numune konulmuştur. Kütle kaybını ölçmek amacıyla şişeler 0,001 duyarlılıkla tartılmıştır.

Şişeler taşıyıcıya yerleştirildikten sonra 85 dakika ve dakikada 15 tur yapacak şekilde döndürülmüşlerdir (hava üfleme düzeneği dakikada 4000 ml olacak şekilde ayarlanmıştır).

Yaşlandırma işlemi sonunda kütle kaybı tespitinde kullanılacak numuneler soğutulmuş ve aynı duyarlılıkla tartılmışlardır.

$$\%Kütle\ Kaybı = (\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}) / \text{İlk Kütle} * 100 \quad (6.1)$$

6.2.2.3 Basınçlı Oksidasyon Kabı Deneyi (AASHTO PP1-93)

Deneyde uzun süreli yaşlanmayı (kaplamaların servis ömrü boyunca yaşlanmaları) temsil etmek üzere asfalt numunesi üzerine, 20 saat boyunca sıcaklık ve basınç işlemi uygulanmaktadır. Kaplama hizmete sunulmadan önce karıştırma ve serme süreçlerinden geçmesi sebebi ile bu deneyde Döner İnce Film Halinde Etüv deneyinde yaşlandırılan numuneler kullanılmaktadır.

Döner İnce Film Halinde Etüv deneyinden elde edilen asfalt her biri 50 gr olacak şekilde üç numune kabına konulmuş (Bu değer yaklaşık 3,2 mm bağlayıcı kalınlığına eşdeğer bir kalınlıktır) ve numune raflarına yerleştirilmiştir. Basınç uygulanmadan önce etüv istenilen sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Deneyde kullanılan asfalt kimyasının değişmemesi için, 115°C sıcaklığın üzerine çıkılmamasına özen gösterilmelidir.

Bu işlemden sonra raflı taşıyıcı, basınç kabına yerleştirilerek sıcaklık kaybına sebep olmadan kapatılmıştır. Gerekli sıcaklığa $\pm 2^\circ\text{C}$ duyarlılıkla yaklaşıldığında basınç verilme işlemine başlanmıştır (2.1 ± 0.1 Mpa'lık üstünde uygulanan basıncın yaşlandırmaya herhangi bir etkisinin olmadığı, dolayısı ile bu değer üzerinde çalışılmaması gerektiği belirtilmektedir). 20 saat sonra basınç boşaltma işlemi yapılmıştır (Bu işlem yaklaşık 10 dakika kadar sürmektedir). Daha sonra numuneler basınç kabından çıkartılmış, 163°C'de 30 dakika etüvde tutularak içinde hapsolan hava uzaklaştırılmış ve numuneler etüvden alınarak diğer deneyler için saklanmıştır.

Bu deney yönteminde kütle kaybı ölçülmemiştir. Çünkü, asfalta basınç uygulanması sırasında asfaltın hava absorbe etmesi nedeni ile bu kayıp anlam kazanmamaktadır.

6.2.2.4 Dinamik Kesme Deneyi (AASHTO TP5)

Deneye başlamadan önce bağlayıcı, akıcı hale getirilinceye kadar ısıtılmış ve uygun numune kalınlığı elde etmek üzere plakalar arasına yerleştirilmiştir. İki plaka arasından taşan kısımlar temizlendikten sonra gerekli boşluk değeri ayarlanmıştır.

Numune yerleştirilip test sıcaklığına erişildiğinde, en az on dakika beklenerek numunenin her tarafında aynı sıcaklık olacak şekilde ısı dengelenmiş, daha sonra salınım hızı (10 rad/sn) ve kesme birim şekil değiştirme değeri (bu değer, orijinal veya RTFO ile yaşlandırılmış numunelerde %10-%12; PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise yaklaşık %1 olarak seçilmektedir) ayarlanmıştır. Deneye başlamak için bağlayıcı üzerine 10 tur yükleme yapılarak numune hazır hale getirilmiştir. Bu hazırlama süresi boyunca reometre, gerekli kesme birim şekil değiştirme değerini sabit tutacak şekilde gerilme değerini sürekli ölçmekte ve deney boyunca bu değeri sabit tutmaktadır. Bu süre sonunda 10 ilave tur daha yapılarak deney verileri elde edilmiştir. Dinamik kesme reometresi, gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkiyi kullanarak G^* ve δ değerlerini otomatik olarak hesaplamaktadır. Elde edilen bu değerler Superpave bitüm şartnamelerinde kullanılmaktadır.

6.2.2.5 Asfalt Kiriş Eğilme Deneyi (AASHTO TP1)

Bu deneyde numunenin yük altındaki sertliğinin saptanmasında kiriş teorisi kullanılmaktadır. Kiriş şeklindeki asfalt numuneye sabit yük uygulanmış ve 4 dakikalık deney süresi boyunca kirişin ortasında oluşan yerdeğiştirmeye ölçülüp sünme sertliği (s) ve sünme oranı (m) hesaplanmıştır (Sünme sertliği, asfaltın sünme yüklerine karşı gösterdiği direnç; m değeri ise, yükleme süresi boyunca asfaltın sertliğindeki değişimdir).

Deney numunesi, 135°C'de sıvı hale getirildikten sonra, dikdörtgen kesitli alüminyum kalıbın içine dökülmüştür. Numune kalıp içinde oda sıcaklığında iki saati geçmeyecek şekilde bekletilmiş ve deney koşulları hazır olduğunda kalıptan çıkartılmıştır (Numuneyi çıkarmak için kalıp 5-10 dakika kadar dondurucuda soğutulmuştur). Sıcaklık şartlarının oluşması için 60 dakika su banyosunda bekletilen asfalt kiriş mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra numune üzerine koşullandırma işlemi için bir seri yük uygulanmıştır (Koşullandırma işlemi, 30

mN'luk ön yükleme, ardından 1 sn. süre ile 980 mN'luk yerleştirme yükü ve 20 sn. süre ile tekrar 30 mN'lük yükleme işlemlerini içermektedir). Deneyin esas bölümünde, numune üzerine 240 sn. süre ile 980 mN'luk yük uygulanmıştır. Bu süre içinde kiriş ortasındaki yerdeğiştirme miktarı sürekli ölçülmüştür.

Deney sonunda sünme sertliği ve sünme oranı bilgisayardan otomatik olarak alınabilmektedir.

Deneylerin uygulandığı University of Maryland, Yollar Laboratuvarlarında, yaşlanmamış asfalt üzerine uygulanan Dönel Viskozite deneyi ile Döner İnce Film Halinde Etüv deneyi ve Basıncılı Oksidasyon deneylerinden sonra elde edilen asfalt kalıntıları üzerine uygulanan Dinamik Kesme ve Asfalt Kiriş Eğilme deneyleri mevcut olmadığı için ilgili deneyler Maryland Eyaleti Yollar Departmanı (Maryland State Highway Department)'nda uygulanmıştır.

Tablo 6.8'de bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.8 Bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan deneyler ve sonuçları

Bitümün Durumu	Uygulanan Test	Yararlanılan Şartname	Sonuç	Şartname Sınırları
Orjinal Bitüm				
	Özgül Ağırlık (25 °C)	AASHTO T228	1.021	-
	Viskozite, 135 °C	ASTM D4402	0.420 Pa.s	-
	Viskozite 165 °C	ASTM D4402	0.114 Pa.s	-
	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sinδ) 10 rad/sn., 64 °C (Tekerlek izi oluşmasına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	1.260 kPa	1.00 kPa (min.)
RTFOT Kalıntısı				
	Kütle Değişimi	AASHTO T240	0.14 %	-
	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sinδ), 10 rad/sn., 64 °C (Tekerlek izi oluşmasına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	2.516 kPa	2,200 kPa (min.)
PAV Kalıntısı				
	Dinamik Kesme Deneyi (G*/sinδ), 10 rad/sn., 25 °C (Yorulma çatlaklarına karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP5	4154 kPa	5000 kPa (maks.)
	Asfalt Kiriş Eğilme Deneyi 60 sn, -12 °C (Termal çatlaklara karşı direnç göstergesi)	AASHTO TP1	209.0 MPa	300 Mpa (maks.)
	m eğim değeri 60 sn., -12 °C	AASHTO TP1	0.342	0.300 (min)

Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Superpave'in öngördüğü şartname koşullarını sağlamaktadır.

6.3 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı ve Hazırlanması

Bitüm ve agrega özelliklerinin Superpave Şartnamesine uygunluğunun saptanmasından sonra, bitümlü sıcak karışımların hazırlanması işlemine geçilmiştir. Öncelikle, karışımlarda kullanılacak bağlayıcı oranları aşağıda açıklanan yöntemle, agrega danelerini saran asfalt filmi kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra, her bir bitümlü bağlayıcı yüzdesi ile hazırlanan karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları (G_{mm}) hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler absorbe bağlayıcı etkisinde asfalt film kalınlıkları ve hava boşluğu yüzdelерinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Bu işlemlerden sonra, Superpave yoğurmalı pres aleti kullanılarak, farklı asfalt film kalınlıklarına sahip asfalt numuneleri üretilmiştir.

6.3.1 Agrega Yüzey Alanına Bağlı Olarak Bağlayıcı Oranlarının Belirlenmesi

Agrega yüzey alanı, Hveem tarafından, agrega özgül ağırlığının 2,65 ve dane şeklinin küresel olması kabulü ile hesaplanmıştır (The Shell Bitumen Handbook, 1990). Tablo 6.9'da elek çaplarına bağlı olarak yüzey alanı katsayıları ve bitümlü sıcak karışımda kullanılan agreganın yüzey alanı hesabı verilmiştir.

The Shell Bitumen Handbook (1990)'da belirtildiği gibi, karışımlarda ortalama asfalt film kalınlığı 5µ ile 15µ aralığında değişmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda 6µ ,7µ ,9µ ,11µ ve 13µ asfalt film kalınlıkları ile çalışılmıştır. Asfalt film kalınlığına bağlı olarak bağlayıcı yüzdesi aşağıdaki bağıntı ile bulunmuştur (Kandhal ve diğ., 1998).

$$h = \frac{P_b}{100 - P_b} * \frac{1}{\gamma_b} * \frac{1}{SA} * 1000 \quad (6.2)$$

Tablo 6.9 Yüzey alanı hesabı

Elek çapı,mm	Yüzey Alanı Faktörleri	Karışım Gradasyonu (% Geçen)	Yüzey Alanı, m ² /kg (yüzey alanı faktörü*%geçen)
19 mm	$\begin{array}{c} \uparrow \\ 0.41 \\ \downarrow \end{array}$	100	$\begin{array}{c} \uparrow \\ 0.41 * 1 = 0.41 \\ \downarrow \end{array}$
12,5 mm		97	
9,5 mm		87	
4,75 mm	0.41	58	$0.41 * 0.58 = 0.238$
2,36 mm	0.82	35	$0.82 * 0.35 = 0.287$
1,18 mm	1.64	21	$1.64 * 0.21 = 0.345$
0,6 mm	2.87	13	$2.87 * 0.13 = 0.874$
0,3 mm	6.14	9	$6.14 * 0.09 = 0.553$
0,15 mm	12.29	8	$12.29 * 0.08 = 0.984$
0,075mm	32.77	6.1	$32.77 * 0.061 = 1.999$
			5.18707 m²/kg

Formülde;

h = Asfalt filmi kalınlığı, μ

P_b = Asfalt yüzdesi

γ_b = Asfaltın özgül ağırlığı

SA= Agrega yüzey alanı

Tablo 6.10'da, yukarıdaki bağıntı kullanılarak, film kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan asfalt yüzdeleri verilmiştir.

SA= 5.18707 m²/kg

$\gamma_b=1.021$

Tablo 6.10 Bağlayıcı yüzdeleri hesabı

Asfalt Film Kalınlığı (μ)	Efektif Asfalt Ağırlığı, (kg/kg agregası)	Asfalt Yüzdesi
6	$5.18707 * 6e^{-6} * 1.021 * 1000=0.0318$	%3.08
7	$5.18707 * 7e^{-6} * 1.021 * 1000=0.0371$	%3.58
9	$5.18707 * 9e^{-6} * 1.021 * 1000=0.0477$	%4.56
11	$5.18707 * 11e^{-6} * 1.021 * 1000=0.0583$	%5.50
13	$5.18707 * 13e^{-6} * 1.021 * 1000=0.0689$	%6.45

Asfalt film kalınlıklarına bağlı asfalt yüzdeleri belirlendikten sonra bitümlü sıcak karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları (G_{mm}) aşağıdaki yöntemle hesaplanmıştır (ASTM D2041-78/AASHTO TP39-94).

Agrega, karışım gradasyonuna uygun olarak tartılıp hazırlanmış ve çeşitli oranlarda bağlayıcı ile karıştırılmıştır. Deney numunesi, nominal maksimum dane boyutlarına göre şartnamede belirtilen değere göre alınmıştır (Deneyde nominal maksimum boyut 12,5mm olduğu için, 1500gr.'lık numune alınmıştır).

Karıştırma işleminden sonra oda sıcaklığında bir süre bekletilen bitümlü sıcak karışım numunesi, daneleri kırmamaya özen gösterecek şekilde elle tanelenerek ayrılmıştır. Tanelenerek ve karıştırılarak soğutulmuş karışım, metal piknometreye konularak tartılmış ve numunenin net ağırlığı hesaplanmıştır (A).

Bu aşamadan sonra, numune ile dolu piknometre içine, bütün numuneyi kaplayacak şekilde saf su ilave edilmiş ve piknometreye vakum uygulanmaya başlanmıştır. Karışım içindeki hava kabarcıklarının tamamen alındığı gözleninceye kadar (bu süre yaklaşık 15 ± 2 dakikadır) vakum işlemine devam edilmiştir. İşlemin sonunda, piknometrenin tamamı su ile doldurulduktan sonra 25°C'ye ayarlı su banyosunda bekletilmiş ve piknometre içindeki malzemenin su içindeki net ağırlığı ölçülmüştür (C).

$$G_{mm} = \frac{A}{A - C} \quad (6.3)$$

Tablo 6.10’da hesaplanmış bağlayıcı yüzdeleri ile hazırlanan karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları Tablo 6.11’de verilmektedir.

Tablo 6.11 Asfalt film kalınlığına bağlı maksimum teorik özgül ağırlık değerleri

Asfalt Film Kalınlığı (μ)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})
6	2.575
7	2.555
9	2.517
11	2.481
13	2.446

6.3.2 Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları

Bölüm 6.3.1’de verilen bağıntı ile hesaplanmış bağlayıcı yüzdeleri, absorbe asfalt miktarı gözönüne alınmadan bulunan değerlerdir. Iowa Ulaştırma Departmanı (Iowa Department of Transportation)’nda Heitzman (1997), tarafından yapılan çalışmalar, agrega danelerini saran asfalt film kalınlıklarının hesaplanmasında, absorbe asfalt miktarlarının da dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. İlgili bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$Pb_e = P_b - \frac{P_{ba} * P_s}{100} \quad (6.4)$$

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\left(\frac{100}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{\gamma_b}\right)} \quad (6.5)$$

$$P_{ba} = \frac{100 * (G_{se} - G_{sb})}{(G_{se} * G_{sb})} * \gamma_b \quad (6.6)$$

$$h = \frac{P_{be} * 10}{SA} \quad (6.7)$$

Burada;

P_b = Karışımdaki asfalt yüzdesi,

P_s = Karışımdaki agreganın yüzdesi,

G_{se} = Karışımdaki agreganın efektif özgül ağırlığı,

G_{sb} = Karışımdaki agreganın hacim özgül ağırlığı,

G_{mm} = Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı,

γ_b = Asfaltın özgül ağırlığı,

P_{ba} = Karışımdaki absorbe asfalt yüzdesi,

P_{be} = Efektif asfalt yüzdesi,

SA = Agreganın yüzey alanı, (m^2/kg)

h = Asfalt film kalınlığı, μ

Hazırlanan karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları (Tablo 6.11) hesaplandıktan sonra yukarıdaki bağıntılar kullanılarak efektif ve absorbe asfalt içerikleri hesaplanmış ve yeni asfalt film kalınlıkları saptanmıştır. Tablo 6.12’de bu yöntem ile hesaplanmış asfalt film kalınlıkları verilmektedir.

Tablo 6.12 Absorbe asfalt dikkate alınarak hesaplanan asfalt film kalınlıkları

Asfalt Yüzdesi	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Efektif asfalt yüzdesi, P_{be}	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)
3.08	6	2.531	4.9
3.58	7	3.034	5.8
4.56	9	4.020	7.7
5.5	11	4.965	9.6
6.45	13	5.921	11.4

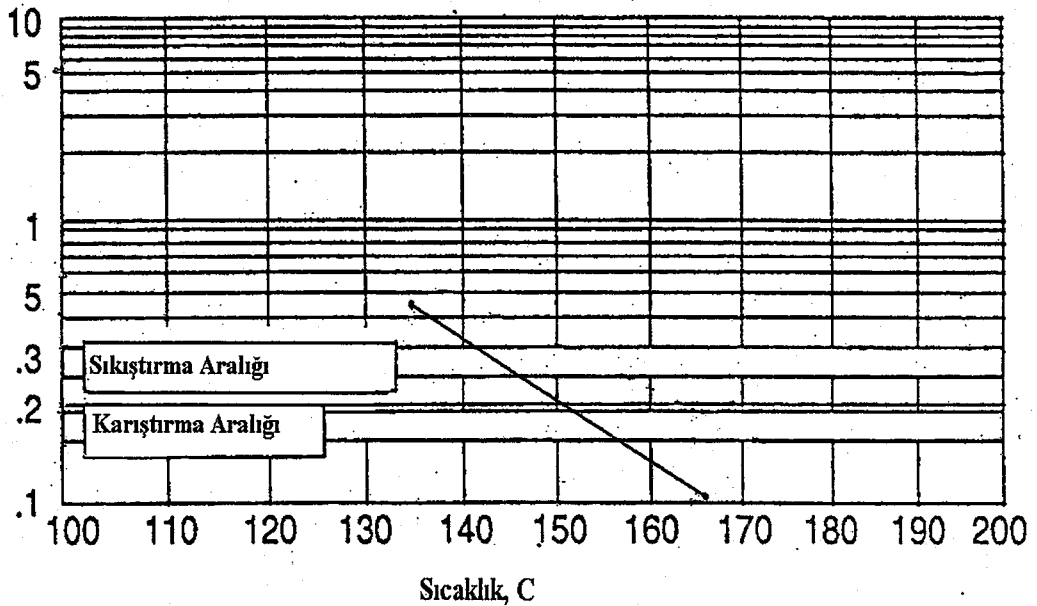
6.3.3 Superpave Yoğurmalı Pres Aletini Kullanılarak Bitümlü Karışımların Hazırlanması (ASTM D4013-98/AASHTO TP94-93)

Bu bölümde, Superpave yoğurmalı pres aleti kullanılarak, bitümlü karışım hazırlama prensipleri üzerinde durulacaktır.

Agrega ve deneyde kullanılacak asfalt özelliklerinin belirlenmesinden sonra minimum ve maksimum karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi işlemine geçilmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları; yaşlandırılmamış asfaltın sırası ile $0,17 \pm 0,02$ Pa-s (170 ± 20 mm²/s) ve $0,28 \pm 0,03$ Pa-s (280 ± 30 mm²/s) viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralığı olarak tanımlanmaktadır (The Shell Bitumen Handbook, 1990).

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını saptamak için karışımda kullanılan asfaltın 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler, yarı-logaritmik bir grafik üzerine işaretlenmiştir (Şekil 6.29). Bu iki noktanın birleştirilmesiyle oluşan doğru üzerinde, yukarıda belirtilen viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları saptanmıştır. Bu aralıklar Tablo 6.13'te verilmiştir.

Viskozite, Pa.s



Şekil 6.29 PG 64-22 Bağlayıcıya ait sıcaklık-viskozite ilişkisi

Tablo 6.13 Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

	Sıcaklık, °C	
	Maksimum	Minimum
Karıştırma	158	152
Sıkıştırma	147	142

Karışım tasarımında 150 mm çaplı her bir numuneyi hazırlamak için 4500 gram agregâ kullanılmıştır. Agregâlar, öncelikle karıştırma sıcaklığının 15°C üzerinde bir sıcaklıkta yaklaşık 2-4 saat arasında ısıtılmışlardır (Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996). Bu işlem sırasında asfalt ile beraber, karıştırma kabı, spatül, yoğurmalı pres kalıpları gibi aletler de ısıtılmıştır.

Isıtılan agregâ, aynı sıcaklık derecesinde ısıtılmış bir kap içine boşaltılmış, darası alınmış ve belli oranda asfalt ile tüm agregâ daneleri tamamıyla kaplanana kadar özel mikser ile karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra sıkıştırma işlemine geçilerek deneye tabi tutulacak numuneler üretilmiştir. Numuneler;

-Yaşlandırma işlemi uygulanmadan,

-Kısa ve uzun dönem yaşlandırma uygulanarak,

hazırlanmıştır.

-Karıştırma işleminin hemen ardından sıcak karışımın sıkıştırılması (Yaşlandırma işlemi uygulanmadan)

Sıcak karışım, daha önceden belirlenmiş sıkıştırma sıcaklık derecesine düşmesi beklendikten sonra, herhangi bir yaşlandırılma işlemi yapılmadan Superpave yoğurmalı pres aleti ile sıkıştırma işlemine geçilmiştir.

Etüvde ısıtılmış olan yoğurmalı pres kalıbı ve taban plakası dışarı çıkartıldıktan sonra, karışım kalıp içine yerleştirilmiştir. Daha sonra sıcak karışım içeren kalıp, alet içine yerleştirilerek numune üzerine 600 kPa $\pm$ 18'lik düşey basınç sağlanıncaya kadar kuvvet başlığı indirilmiştir. 1.25 $\pm$ 0,02° dönüş açısı da sağlandıktan sonra sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem istenilen dönüş sayısına ulaşıldığında son bulmaktadır.

-Karıştırma ve kısa dönem yaşlandırma işlemini takiben sıcak karışımın sıkıştırılması (Kısa ve uzun dönem yaşlandırma uygulanarak-AASHTO PP2-94)

AASHTO PP2-94 Standardı sıcak asfalt karışımlarının kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmalarına ilişkin deney yöntemini kapsamaktadır.

Sıcak karıştırma işleminden sonra sıkıştırılmamış karışım, dört köşe bir tepsiye m²'ye 21 kg malzeme gelecek biçimde yayılmış ve 135°C'deki etüvde 4 saat süre ile bekletilmiştir. Bu işlem, sıcak asfalt karışımının kısa dönem yaşlanmasını temsil etmektedir. Karışım etüvden çıkartıldıktan sonra sıkıştırma işlemine geçilmiştir. Belirlenen sıkıştırma sıcaklık aralığı olan 142°C-147°C'lik etüvde yaklaşık 30 dakika bekletilerek karışımın istenilen sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır.

Bu işlemden sonra, sıkıştırma işlemi yukarıdaki şekilde tekrar edilmiştir.

Bir sonraki bölümde anlatılacağı üzere, asfalt numunelerinin esneklik modüllerinin ve indirekt çekme değerlerinin saptanabilmesi için, hiç yaşlandırma işlemi uygulanmadan ve/veya kısa dönem yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra sıkıştırılan 150 mm çaplı numunelerden, 100 mm çap ve 63.5 mm yüksekliğinde karotlar alınmıştır. Şekil 6.30'da karot alma ve kesme işlemlerinden sonra deneye uygun hale getirilen numuneler görülmektedir.



Şekil 6.30 Superpave Yoğurmalı Pres aletinden elde edilen numune (A) ve karot ve kesme işleminden sonra elde edilen numuneler (B, C)

AASHTO PP2-94 Standardının diğerk bir bölümünü ise uzun dönem yaşlandırma işlemi kapsamaktadır. Bu işlemde, kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulan karışımlar, sıkıştırılmışlar, karot alma ve kesme işlemlerinden sonra 85°C sıcaklıktaki etüvde 120 saat bekletilmişlerdir.

6.3.4 Bitümlü Sıcak Karışımların Değişik Hava Boşluk Oranları ile Sıkıştırılması

Bitümlü sıcak karışımların istenilen hava boşluk oranı ile sıkıştırılması işlemi, yoğurmalı pres kalıbının dönüş sayısına bağlıdır. Bölüm 6.3.3'te açıklandığı gibi Superpave yoğurmalı pres aleti ile işlem boyunca dönüş sayısına bağlı olarak kaydedilen numune yüksekliği ve %G_{mm} (%maksimum teorik özgül ağırlık) değerleri seri kablo ile bilgisayara gönderilmiştir. Elde edilen değerler hava boşluk oranlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Superpave yoğurmalı pres aleti ile, dönüş sayısına bağlı olarak sıkıştırılan bitümlü sıcak karışımların hava boşluk oranları Tablo A.1'de verilmiştir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

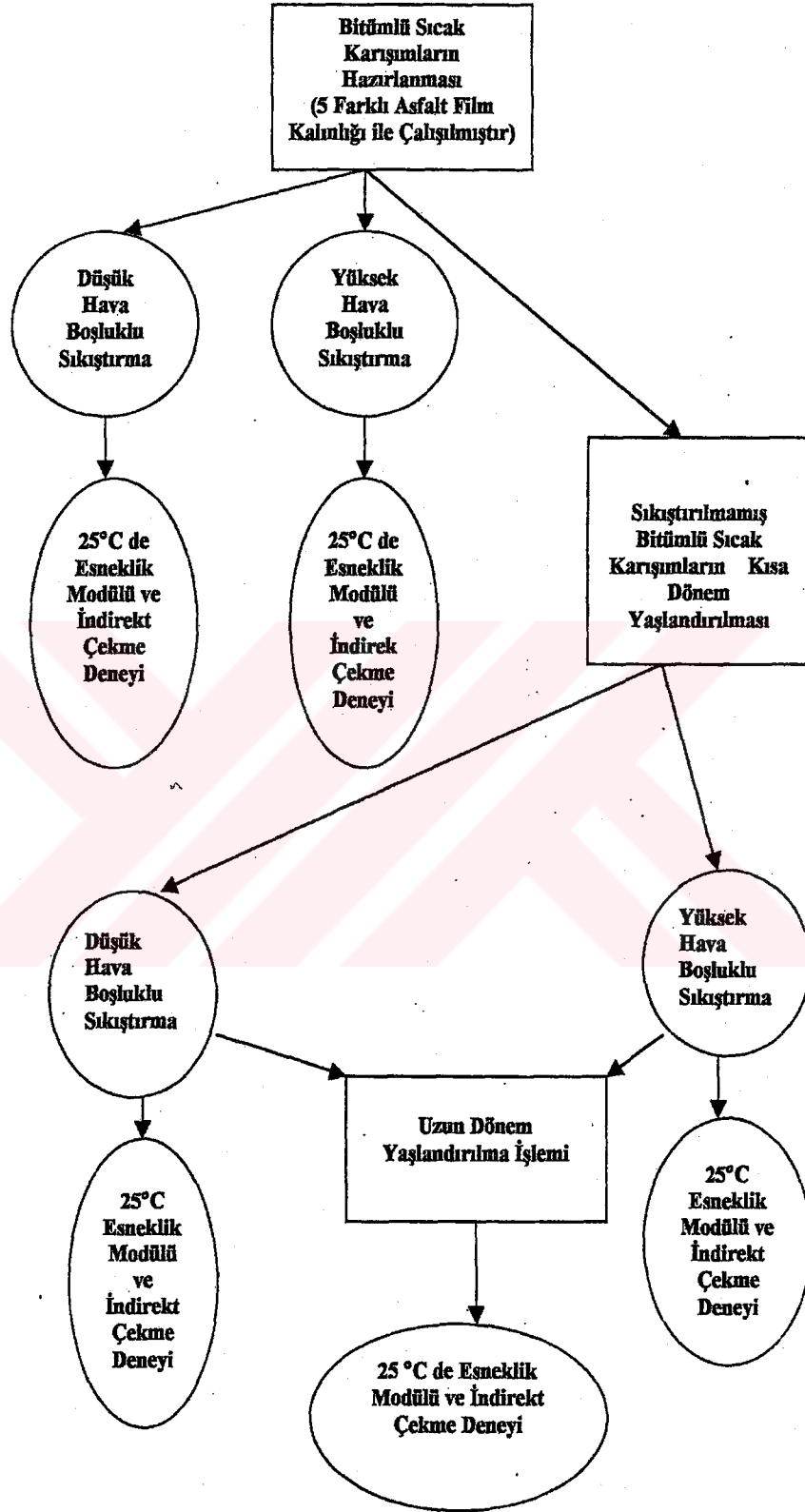
Bu bölümde, farklı asfalt film kalınlıklarına sahip bitümlü sıcak karışımların yaşlanma özelliklerinin ve suya karşı duyarlılıklarının incelenmesi amacıyla uygulanan esneklik modülü ve indirekt çekme deneyleri ayrıntılı olarak açıklanacak ve sonuçlar değerlendirilecektir.

7.1 Yaşlanma Etkisinin İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelere uygulanan esneklik modülü (resilient modulus) ve indirekt çekme deneylerine ilişkin deney sonuçları verilecektir. Araştırmacıların yaptığı çalışmalar, karışımların yaşlanma etkilerinin esneklik modülü ve indirekt çekme deneyleri ile değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (Von Quintas ve diğ., 1998). Şekil 7.1’de karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılma etkilerinin incelenmesine ilişkin akış şeması verilmektedir.

7.1.1 Bitümlü Karışımların Esneklik Modülü için İndirekt Çekme Deneyi (ASTM-D4123-82/AASHTO TP31-94/)

Trafik yükleri altındaki üstyapı tabakalarında ortaya çıkan gerilme ve birim şekil değiştirmelerin tahmini için, üstyapıyı oluşturan malzemelerin gerilme-birim deformasyon davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Tekerlek yükü nedeniyle ortaya çıkan bu deformasyon kalıcı olmayıp, büyük bir bölümü geri gelen deformasyondur. Bu yüzden trafik yükleri altındaki üst yapıların gerilme ve birim deformasyon değerlerinin saptanması için esneklik modülünün uygun bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Esneklik modülü, uygulanan gerilme ile tekrarlı trafik yükü altında geri gelen birim deformasyon arasındaki ilişkidir. Esneklik modülünün belirlenmesi için çok sayıda deney sistemleri ve işlemleri geliştirilmiştir.

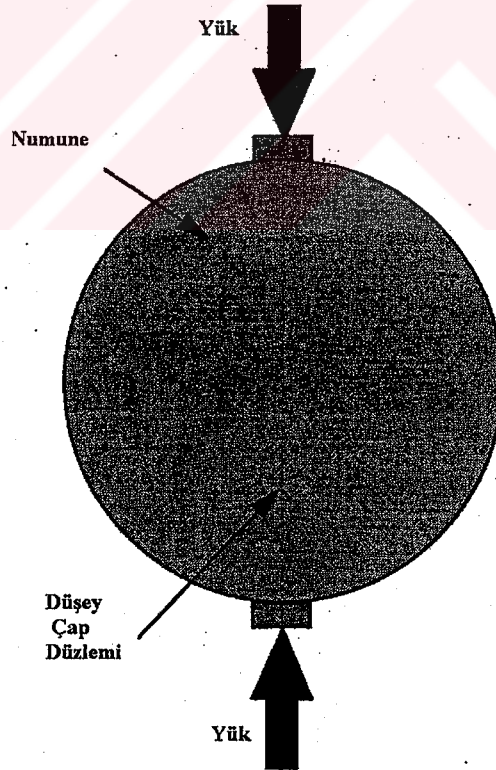


Şekil 7.1 Karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılma etkilerinin incelenmesine ilişkin akış şeması

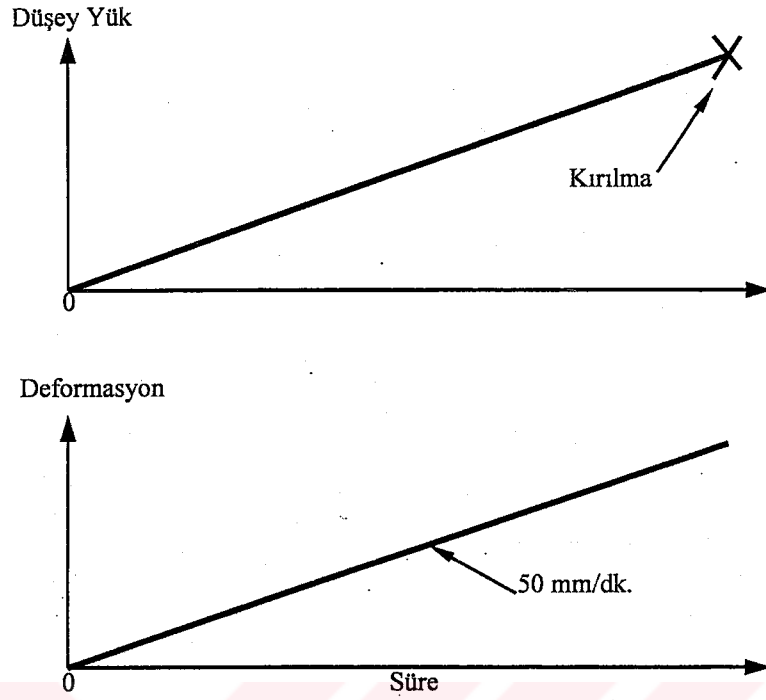
Bu deneylerin başlıcaları; doğrudan çekme, kiriş eğilme, dolaylı çekme (indirekt çekme) ve üç eksenli basınç deneyleridir. Deneylerin hepsinde tekrarlı yük uygulanmaktadır. Bu deneylerden indirekt çekme deneyi, asfalt betonunun, üç eksenli basınç deneyi ise temel veya zemin tabaka malzemelerinin esneklik modülünün saptanmasında kullanılmaktadır. Aşağıda esneklik modülünün saptanmasına ilişkin indirekt çekme deneyi yöntemi tanıtılmaktadır.

Numuneler, deneye başlanmadan önce, 24 saat süre ile 25°C sıcaklığındaki sıcaklık kontrol kabininde bırakılmıştır. İstenilen deney sıcaklığına erişilip erişilmediği, kabin merkezinde bulunan ve ortam sıcaklığını ölçen örnek bir numune (thermocouple) aracılığı ile kontrol edilmiştir.

Esneklik modülü deneyinde uygulanacak yükün saptanması için, öncelikle indirekt çekme deneyi uygulanmıştır. Bu deney, dakikada 2 inç (50,4mm) yükleme hızına sahip bir test başlığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneye ait şekil ve grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 7.2 ve Şekil 7.3).



Şekil 7.2 İndirekt çekme gerilmesi deneyine ilişkin yükleme şekli (Kennedy ve diğ., 1997)



Şekil 7.3 İndirekt Çekme gerilmesi deneyine ilişkin yük-deformasyon özellikleri
(Kennedy ve diğ., 1997)

Deneyden elde edilen yük değeri, aşağıdaki formülde yerine konularak indirekt çekme mukavemeti değeri bulunmuştur.

$$S_T = \frac{2 * P}{\pi * h_k * D} \quad (7.1)$$

Burada;

P = Uygulanan maksimum Yük, kg (veya lb.)

h_k = Numune yüksekliği, cm (veya inç)

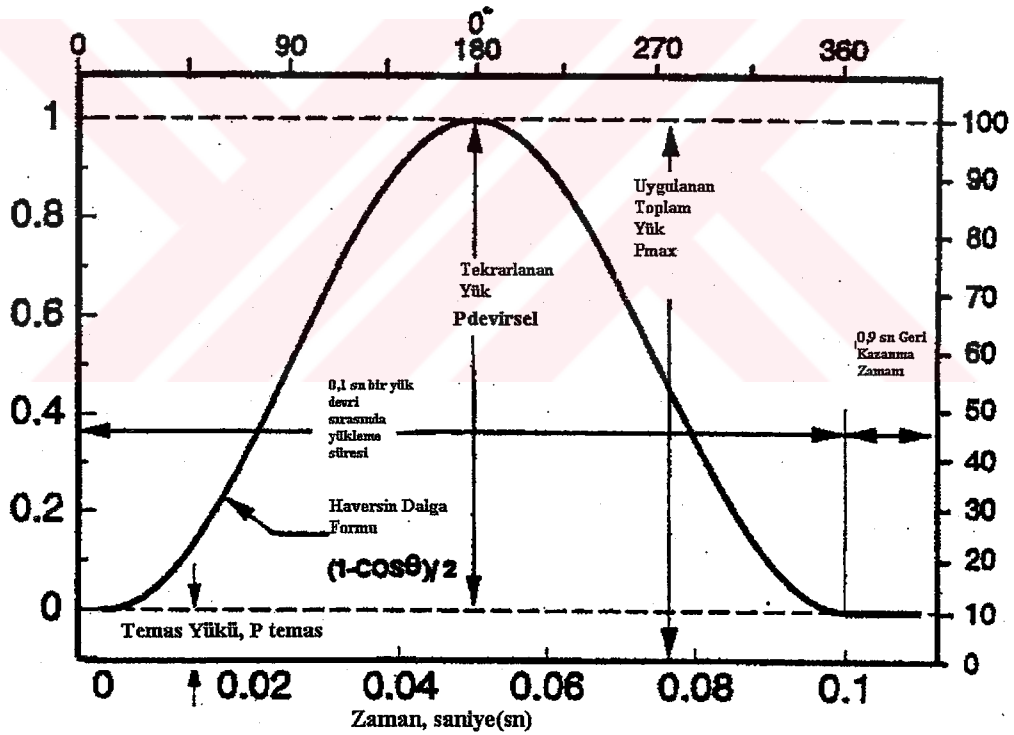
D = Numune çapı, cm (veya inç)

S_T = İndirekt çekme mukavemeti, MPa veya (psi)

Şartnamelerde gerekli görüldüğü üzere, esneklik modülünün saptanmasında kullanılacak yük değeri ve yerleştirme yükü, yukarıdaki formülden elde edilen indirekt çekme mukavemetinin sırasıyla %15'i ve %1.5'u alınarak hesaplanmıştır.

Yük belirlendikten sonra numune, yükleme şeritleri düşey çap düzlemine paralel olarak ortalanarak yükleme aletinin içine yerleştirilmiş, LVDT'ler dengelenmiş, MTS ve LabView ayarlanmıştır.

Numune homojen deformasyon okuması elde edilebilecek yeterlikte bir minimum periyotta, darbe etkisi oluşturmada, tekrarlı bir haversin dalga formu uygulanarak koşullandırılmıştır. Bu işlemin amacı, deney sırasında meydana gelen deformasyonların dengeli hale gelmesini sağlamaktır. Koşullandırma için yük tekrar sayısı, deney sıcaklığına göre değişmektedir (Yük tekrar sayısı; 5°C için 50-150, 25°C için 50-100 ve 40°C için 20-50 olarak uygulanmaktadır). Şartnameye göre bu değer 100 olarak seçilmiştir. Şekil 7.4'te tipik bir haversin dalga formu ve ilgili açıklamalar görülmektedir.



Şekil 7.4 Esneklik modülü yük grafiği (Barksdale, 1998)

Deney uygulaması sırasında kullanılan haversin tipi dalga formunun frekansı 1 Hz'dir, yani 1 sn.'lik yükleme süresine karşılık gelmektedir. Bu süre, 0.1 sn. yük uygulama zamanı (load duration) ve 0.9 sn. geri kazanma zamanından (rest period) oluşmaktadır. Haversin tipi dalga formu, matematiksel olarak $(1 - \cos\theta)/2$ şeklinde ifade edilmektedir. Uygulanan yük bileşenleri ise;

$$P_{\max} = P_{\text{temas}} + P_{\text{devirsel}} \quad (7.2)$$

ile ifade edilmektedir. Burada;

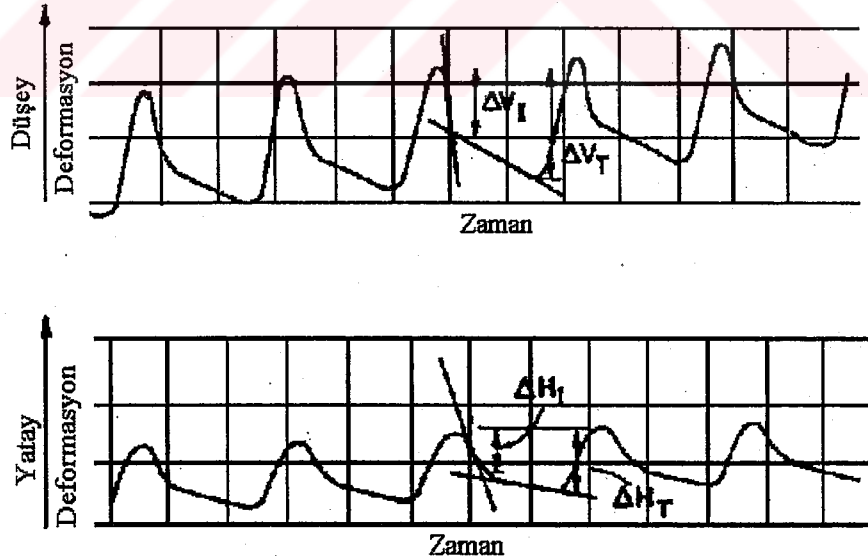
$P_{\max}$ = Uygulanan toplam yük. Bu değer yukarıda anlatılan indirekt çekme deneyi sonunda saptanmıştır.

P_{temas} = Yükleme şeridi ile numune arasında teması sağlayacak düşey yük. Bu değer şartnamelere göre, 25°C sıcaklık için $P_{\max}$ 'ın %4'ü olarak alınmıştır.

P_{devirsel} = Numunenin esneklik modülünün hesaplanmasında kullanılan yük

Koşullandırma işleminden sonra, numune üzerine 30 adet devirsel yük uygulanmıştır. Esneklik modülü hesaplamalarında, son üç yükleme devri sonunda oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülmüştür (Şekil 7.5).

Birinci deneyden sonra, numune 90° çevrilerek, sıcaklık kontrol kabiniinde 10 dakika bekletilmiş, deney bir kez daha tekrarlanarak deformasyon değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7.5 Zamana bağlı yatay ve düşey deformasyon eğrileri (Önal ve Kahramangil, 1993)

Deformasyonlar ölçüldükten sonra, esneklik modülü değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$E_{R1} = \frac{P_{dev} * (\nu_{R1} + 0,27)}{h_k * \Delta H_1} \quad (7.3)$$

$$E_{RT} = \frac{P_{dev} * (\nu_{RT} + 0,27)}{h_k * \Delta H_T} \quad (7.4)$$

Burada:

P_{dev} = Devirsel yük, kg (veya lb)

h_k = Numune yüksekliği, mm (veya inç)

ΔH_1 = Ani geri gelen yatay deformasyon, mm (veya inç)

ΔH_T = Toplam geri gelen yatay deformasyon, mm (veya inç)

ν_{R1} = Ani esneklik poisson oranı

ν_{RT} = Toplam esneklik poisson oranı

Yukarıda ayrıntılı biçimde anlatılan esneklik modülü deneyinin çerçevesinde, deneyde kullanılacak değişkenler Tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7.1 Deneyisel tasarım değişkenleri

Bitümlü Bağlayıcı Tipi		PG 64-22
Agrega Cinsi		Kireçtaşı
Asfalt Film Kalınlığı	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları	6 μ - 7 μ - 9 μ - 11 μ - 13 μ
	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları	4.9 μ - 5.8 μ - 7.7 μ - 9.6 μ - 11.4 μ
Yaşlandırma Durumu		
Hiç Yaşlandırma İşlemi Uygulanmamış		
Kısa Dönem Yaşlandırma İşlemi Uygulanmış		135°C/4 saat
Uzun Dönem Yaşlandırma İşlemi Uygulanmış		85°C/120 saat
Hedeflenen Hava Boşluk Oranları		Düşük – Yüksek (%3-%5) – (%6-%7)
Uygulanan Deneyler		Esneklik Modülü, İndirekt Çekme Deneyi
Deney Tekrarı		2

Tablo B.1-B.6 ve Tablo C.1’de yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin sırası ile esneklik modülü ve indirekt çekme deneyi sonuçları verilmektedir.

Aynı boşluk oranı ve aynı asfalt film kalınlığına sahip numunelerin yaşlandırılma süreleri (yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış) ile esneklik modülleri ve indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki ilişki Şekil D.1-D.5 ve Şekil E.1-E.5’te verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, bitümlü karışımların yaşlandırılma süreleri arttırıldıkça esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi değerleri artmaktadır.

Bu durum, esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi değerlerinin artmasının, yaşlanmanın bir göstergesi olarak kabul edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

AASHTO 93 Üstyapı Projelendirme Rehberi’nde (AASHTO, 1993) kaplama tabakasında kullanılacak asfalt betonlarının 20°C (68°F)’deki esneklik modülü değerlerinin 3100 Mpa (450.000 psi)’ı geçmemesi tavsiye edilmiştir. Yüksek esneklik modülüne sahip asfalt betonları daha sert ve eğilmeye karşı daha dirençli olmalarına karşın, yorulma ve termal çatlaklara karşı daha duyarlıdırlar. Bu nedenle yaşlanma sonunda esneklik modülünün artması, kaplama tabakasında sorunlar yaratacak olumsuz bir gelişme olarak değerlendirilmelidir.

7.1.2 Esneklik Modülü ve İndirekt Çekme Deneyi Sonuçlarına İlişkin Modeller

Ekteki şekillerde (Şekil F.1-Şekil F.2 ve Şekil G.1-Şekil G.2) sırasıyla asfalt film kalınlığına bağlı hesaplanmış ortalama esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi grafikleri verilmektedir. Elde edilen eğriler üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve film kalınlığına bağlı olarak uygun modeller geliştirilmiştir.

-Esneklik Modülü Modelleri

Film kalınlığı ile yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin esneklik modülleri arasında çizilen eğrilerden (Şekil F.1 ve Şekil F.2) elde edilen bağıntılar aşağıda verilmiştir.

- Yaşlandırılmamış, Düşük Hava Boşluklu,

$$M_{Ryaşdüş} = 92.174h^2 - 1878.5h + 12495 \quad R^2=0.9767 \quad (7.5)$$

- Yaşlandırılmamış, Yüksek Hava Boşluklu,

$$M_{Ryaşyük} = 39.411h^2 - 904.98h + 7588.3 \quad R^2=0.9817 \quad (7.6)$$

- Kısa Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu,

$$M_{Rstdüş} = 101.88h^2 - 2320.4h + 16692 \quad R^2=0.9766 \quad (7.7)$$

- Kısa Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu,

$$M_{Rstyük} = 87.521h^2 - 1961.5h + 14171 \quad R^2=0.9883 \quad (7.8)$$

- Uzun Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu,

$$M_{Rlt_düş} = 124.59h^2 - 2964.1h + 22007 \quad R^2=0.9796 \quad (7.9)$$

- Uzun Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu

$$M_{Rlt_yük} = 111.32h^2 - 2574.1h + 18959 \quad R^2=0.9756 \quad (7.10)$$

Bağıntılarda;

$M_{Ryaşdüş}$ = Yaşlandırılmamış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

$M_{Ryaşyük}$ = Yaşlandırılmamış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

$M_{Rst_düş}$ = Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

$M_{Rst_{yük}}$ = Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

$M_{Rlt_{düş}}$ = Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

$M_{Rlt_{yük}}$ = Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, MPa

h = Asfalt filmi kalınlığı, μ

Esneklik modülü deneyi sonuçlarından farklı boşluk oranları ve değişik yaşlandırma süreleri için film kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon katsayılarının ortalama 0.98 olduğu görülmektedir.

Esneklik modülü model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde, eğrinin 9-10 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9-10 μ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde yaşlanmanın etkisi artmakta, büyük değerlerde ise yaşlanmanın etkisi değişmemektedir. Bu durum da, 9-10 μ 'luk film kalınlığının optimum değer olarak kabul edilmesinin uygun olduğunu göstermektedir.

Ayrıca kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile, yaşlandırılmamış düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri asfalt film kalınlığına bağlı olarak oranlanmış ve hesaplanan değerler Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2 Asfalt film kalınlığına bağlı esneklik modülü oranları

Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlığı (μ)	$\frac{M_{Rst_{düşük}}}{M_{Ryaş_{düşük}}}$	$\frac{M_{Rst_{yüksek}}}{M_{Ryaş_{yüksek}}}$	$\frac{M_{Rlt_{düşük}}}{M_{Ryaş_{düşük}}}$	$\frac{M_{Rlt_{yüksek}}}{M_{Ryaş_{yüksek}}}$
4.9	1.42	1.63	1.97	2.26
5.8	1.41	1.55	1.89	2.02
7.7	1.38	1.45	1.81	1.97
9.6	1.32	1.35	1.71	1.84
11.4	1.12	1.33	1.43	1.66

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi film kalınlıkları artışı ile numunelerin esneklik modülü oranları, buna bağlı olarak da yaşlanmaya karşı duyarlılıkları azalmaktadır.

Düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler üzerinde yaşlanmanın etkisini görmek amacıyla kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış numunelerin esneklik modülleri arasında indislerin tanımlanması öngörülmüştür. Aşağıdaki formül ile hesaplanan bu değerler, deney başlangıç koşullarını referans almaktadır.

$$A_1 = \frac{M_{Rst_{düş}} - M_{Ryaş_{düş}}}{M_{Ryaş_{düş}}} \quad (7.11)$$

A_1 =Kısa dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$A_2 = \frac{M_{Rst_{yük}} - M_{Ryaş_{yük}}}{M_{Ryaş_{yük}}} \quad (7.12)$$

A_2 =Kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$A_3 = \frac{M_{Rlt_{düş}} - M_{Ryaş_{düş}}}{M_{Ryaş_{düş}}} \quad (7.13)$$

A_3 =Uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$A_4 = \frac{M_{Rlt_{yük}} - M_{Ryaş_{yük}}}{M_{Ryaş_{yük}}} \quad (7.14)$$

A_4 =Uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

Hava boşluğunun numunelerin yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla asfalt film kalınlığına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri Tablo 7.3'te verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, asfalt film kalınlığı arttıkça, tüm hava boşluk oranları için A katsayıları azalmaktadır. Bir başka deyişle, film kalınlığının artışı ile yaşlanma etkileri azalmaktadır. Ayrıca kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin, düşük hava boşluk oranına sahip numunelere kıyasla yaşlanmaya karşı daha duyarlı oldukları görülmektedir ($A_2 > A_1$). Aynı durum uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler ile düşük hava boşluk oranına sahip numuneler arasında da görülmektedir ($A_4 > A_3$).

Tablo 7.3 Asfalt film kalınlığına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri

Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlığı (μ)	Kısa	Dönem	Uzun	Dönem
	A_1 (düşük hava boşluklu)	A_2 (yüksek hava boşluklu)	A_3 (düşük hava boşluklu)	A_4 (yüksek hava boşluklu)
4.9	0.417	0.633	0.918	1.257
5.8	0.413	0.547	0.885	1.016
7.7	0.380	0.452	0.912	0.966
9.6	0.320	0.351	0.705	0.843
11.4	0.123	0.325	0.431	0.665

Aynı asfalt film kalınlığına sahip numunelerin kısa dönem yaşlanma ile uzun dönem yaşlanma özelliklerine ilişkin esneklik modülleri değerleri birbirine bağlı olarak incelenmiş ve çizilen eğrilerden (Şekil F.3 ve Şekil F.4) aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir. Şekil üzerindeki her nokta ayrı bir film kalınlık değerine karşılık gelmekte ve bu değerler soldan sağa doğru gidildikçe artmaktadır (çünkü esneklik modülü film kalınlığının azalması ile artmaktadır).

- Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluğuna sahip numuneler için esneklik modülü ilişkisi;

$$M_{RIt_{düş}} = 1.3956M_{Rst_{düş}} - 321.5 \quad R^2=0.9964 \quad (7.15)$$

- Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluğuna sahip numuneler için esneklik modülü ilişkisi;

$$M_{RIt_{yük}} = 1.4183M_{Rst_{yük}} - 370.49 \quad R^2=0.9921 \quad (7.16)$$

Numunelerin esneklik modülü değerlerine bağlı olarak elde edilen bağıntılar kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri arasında çok sıkı bir ilişki olduğunu ($R^2 \sim 1$) ve film kalınlığının karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde benzer etkisi olduğunu göstermektedir.

-İndirekt Çekme Deneyi Modelleri

Film kalınlığı ile sıkıştırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmeleri arasında çizilen eğrilerden (Şekil G.1 ve Şekil G.2) elde edilen bağıntılar aşağıda verilmiştir.

- Yaşlandırılmamış Düşük Hava Boşluklu,

$$ITS_{yaş_{düş}} = 10.333h^2 - 259.54h + 2368.4 \quad R^2=0.9592 \quad (7.17)$$

- Yaşlandırılmamış Yüksek Hava Boşluklu,

$$ITS_{yaş_{yük}} = 11.924h^2 - 270.94h + 2119.6 \quad R^2=0.997 \quad (7.18)$$

- Kısa Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu,

$$ITSst_{düş} = 15.406h^2 - 370.4h + 3133.4 \quad R^2=0.9906 \quad (7.19)$$

- Kısa Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu,

$$ITSst_{yük} = 10.996h^2 - 291.45h + 2713.7 \quad R^2=0.9922 \quad (7.20)$$

- Uzun Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu

$$ITSlt_{düş} = 25.693h^2 - 602.81h + 4657.3 \quad R^2=0.9972 \quad (7.21)$$

- Uzun Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu

$$ITSlt_{yük} = 20.541h^2 - 506.8h + 4080 \quad R^2=0.9984 \quad (7.22)$$

Bağıntılarda;

$ITSyaş_{düş}$ = Yaşlandırılmamış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi, kpa

$ITSyaş_{yük}$ = Yaşlandırılmamış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi, kpa

$ITSst_{düş}$ = Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin indirekt çekme gerilmesi, kpa

$ITSst_{yük}$ = Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, kpa

$ITSlt_{düş}$ = Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, kpa

$ITSlt_{yük}$ = Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunenin esneklik modülü, kpa

h = Asfalt filmi kalınlığı, μ

İndirekt çekme gerilmesi deneyi sonuçlarından farklı boşluk oranları ve değişik yaşlandırma süreleri için film kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon katsayılarının ortalama 0.99 olduğu görülmektedir.

İndirekt çekme gerilmesi model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde, eğrinin 9-10 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9-10 μ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde yaşlanmanın etkisi artmakta, büyük değerlerde ise yaşlanmanın etkisi değişmemektedir. Bu durum da, 9-10 μ 'luk film kalınlığının optimum değer olarak kabul edilmesinin uygun olduğunu göstermektedir.

Esneklik modülü değerlerinin modellenmesi bölümünde olduğu gibi, bu bölümde de düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler üzerinde yaşlanmanın etkisini görmek amacıyla kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri ile yaşlandırılmamış numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri arasında indisler tanımlanmıştır. Aşağıdaki formül ile hesaplanan bu değerler, deney başlangıç koşullarını referans almaktadır.

$$B_1 = \frac{ITS_{st_{düş}} - ITS_{yaş_{düş}}}{ITS_{yaş_{düş}}} \quad (7.23)$$

B_1 =Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$B_2 = \frac{ITS_{st_{yük}} - ITS_{yaş_{yük}}}{ITS_{yaş_{yük}}} \quad (7.24)$$

B_2 =Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki farkın,

yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$B_3 = \frac{ITS_{lt_{düş}} - ITS_{yaş_{düş}}}{ITS_{yaş_{düş}}} \quad (7.25)$$

B_3 =Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri ile yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

$$B_4 = \frac{ITS_{lt_{yük}} - ITS_{yaş_{yük}}}{ITS_{yaş_{yük}}} \quad (7.26)$$

B_4 =Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri ile yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki farkın, yaşlandırılmamış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine oranı şeklinde tanımlanan indis değeri

Hava boşluğunun numunelerin yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla asfalt film kalınlığına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.4 Asfalt Film kalınlığına bağlı olarak hesaplanan indis değerleri

Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlığı (μ)	Kısa	Dönem	Uzun	Dönem
	B_1 (düşük hava boşluklu)	B_2 (yüksek hava boşluklu)	B_3 (düşük hava boşluklu)	B_4 (yüksek hava boşluklu)
4.9	0.232	0.446	0.679	0.909
5.8	0.225	0.457	0.750	0.969
7.7	0.212	0.498	0.574	0.899
9.6	0.176	0.538	0.431	0.735
11.4	0.229	0.398	0.528	0.702

Tablodan kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin, düşük hava boşluk oranına sahip numunelere kıyasla yaşlanmaya karşı daha duyarlı oldukları görülmektedir ($B_2 > B_1$). Aynı durum uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numuneler ile düşük hava boşluk oranına sahip numuneler arasında da görülmektedir ($B_4 > B_3$).

Aynı asfalt film kalınlığına sahip numunelerin kısa dönem yaşlanma ile uzun dönem yaşlanma özelliklerine ilişkin indirekt çekme gerilmesi değerleri birbirine bağlı olarak incelenmiş ve çizilen eğrilerden (Şekil G.3 ve Şekil G.4) aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir. Şekil üzerindeki her nokta ayrı bir film kalınlık değerine karşılık gelmekte ve bu değerler soldan sağa doğru gidildikçe artmaktadır (çünkü esneklik modülü film kalınlığının azalması ile artmaktadır).

- Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük hava boşluğuna sahip numuneler için indirekt çekme gerilmesi ilişkisi;

$$ITSIt_{düş} = 1.5426ITSst_{düş} - 42.537 \quad R^2=0.9968 \quad (7.27)$$

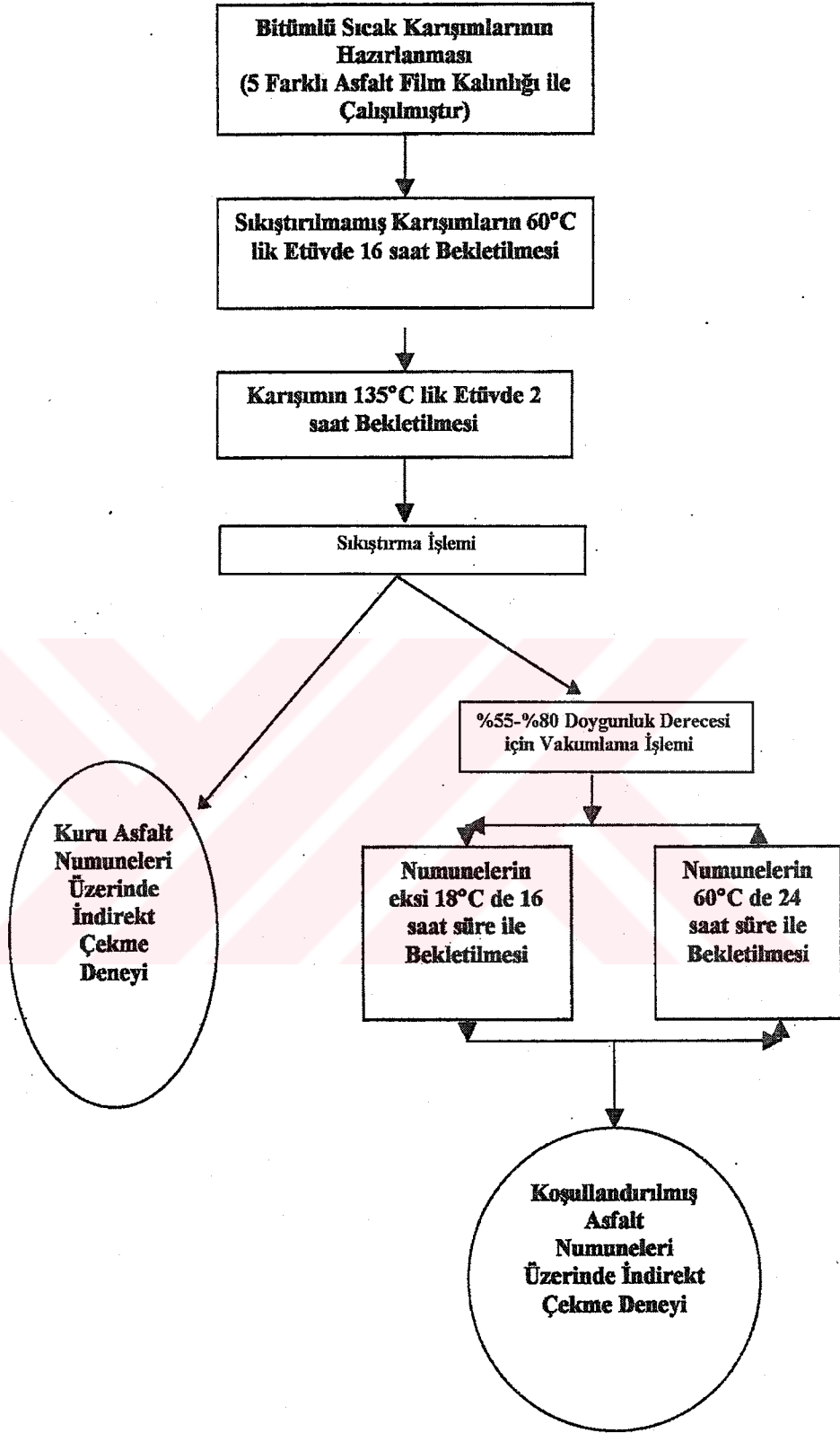
- Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek hava boşluğuna sahip numuneler için indirekt çekme gerilemesi ilişkisi;

$$ITSIt_{yük} = 1.4872ITSst_{yük} - 34.251 \quad R^2=0.9938 \quad (7.28)$$

Numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine bağlı olarak elde edilen bağıntılar kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri arasında çok sıkı bir ilişki olduğunu ($R^2 \sim 1$) ve film kalınlığının karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde benzer etkisi olduğunu göstermektedir.

7.2 Neme Karşı Duyarlılık Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerini ölçmek için kuru ve koşullandırılmış numuneler üzerinde indirekt çekme deneyi uygulanmıştır. Bu deneye ilişkin akış şeması Şekil 7.6'da verilmektedir.



Şekil 7.6 Karışımların suya karşı duyarlılıklarının incelenmesine ilişkin akış şeması

7.2.1 Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Dirençlerinin Saptanması (AASHTO T283-99)

Bu deney, laboratuarda sıkıştırılmış bitümlü karışımların hızlandırılmış su etkileri nedeni ile oluşan çap düzlemindeki indirekt çekme mukavemeti ölçümünü ve bu deney için numune hazırlanmasını kapsamaktadır.

Farklı asfalt film kalınlıkları kullanılarak hazırlanan karışımlar, taban alanı yaklaşık 75-100 inç² olan alüminyum kap içine konularak 2 saat oda sıcaklığında soğutulmuşlardır. Sonra karışımlar kür edilmek üzere 16 saat süre ile 60°C (140°F)'lik etüvde bekletilmişlerdir.

Kür işleminden sonra, 135°C'lik etüvde 2 saat bekletilmiş karışımlar, %7 ± 1.0 hava boşluğunda sıkıştırılmışlardır. İstenilen hava boşluğu, bölüm 6.1.3.3'te tanıtılan yoğurmalı pres aletine ait GyroTalk bilgisayar programı aracılığı ile dönüş sayıları ayarlanarak yapılmıştır. Her bir asfalt film kalınlığı için, üçer adet numune hazırlanmıştır.

Kalıptan çıkartıldıktan sonra, deney numunelerinden karotlar alınmış ve uygun boyutlara getirilmiştir.

Deney numuneleri hazırlandıktan sonra hava boşlukları yaklaşık eşit olacak şekilde farklı iki gruba ayrılmıştır. İlk grup kuru test edilmek üzere oda sıcaklığında plastik sızdırmaz torbalarda saklanmıştır.

Diğer grup ise aşağıdaki şekilde koşullandırılmıştır:

-Numune metal silindirik piknometre içine konulduktan sonra içine üzerine 25°C'de saf su ilave edilmiştir. Daha sonra 5-10 dakika süre ile 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmıştır. Bu işlem sonunda numune yaklaşık 5-10 dakika su içinde bekletilmiş ve absorbe su hacmi aşağıdaki şekilde saptanmıştır.

$$J = B' - B \quad (7.29)$$

Burada;

J = Absorbe su hacmi, cm³

B' = Kısmi vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı, gr.

B = Kısmi vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı, gr.

-Absorbe su hacmi ile hava boşlukları karşılaştırılmış ve doymuşluk derecesi hesaplanmıştır.

$$S' = \frac{100 * J}{I} \quad (7.30)$$

$$I = \frac{V_a * V}{100} \quad (7.31)$$

Yukarıdaki formülde;

S' = Doymuşluk derecesi, %

J = Absorbe su hacmi, cm³

I = Hava boşluğu hacmi, cm³

V_a = Hava boşluğu yüzdesi

V = Numune hacmi, cm³

(Şartname uyarınca yukarıda hesaplanan doymuşluk derecesinin, %55-%80 aralığında olması gerekmektedir. Eğer bu değer %55 ten küçük ise daha fazla vakum uygulanır ve/veya vakum süresi arttırılır, %80'den fazla ise numune hasar görmüş sayılmaktadır).

-Belirtilen ölçütler arasında doymuşluk derecesi elde edildikten sonra, vakumla doyurulmuş numuneler plastik bir film tabakası içine sarılmış ve her biri içinde 10 ml su bulunduran plastik torbalara konulmuştur.

-İçinde numune olan plastik torba, 16 saat süre ile -18 ± 3°C'lik dondurucu içinde bekletildikten sonra, 24 saat süreyle 60 ± 1°C'lik su banyosuna alınmıştır.

-Bu işlemden sonra, numuneler 2 saat süre ile $25\pm0,5^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanmış su banyosunda bekletilmişlerdir.

-Kuru ve yukarıdaki şekilde koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilme değerleri saptanmıştır.

-Numunelerin neme karşı duyarlılıklarını saptamak için, koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmelerinin kuru numunelerin indirekt çekme gerilmelerine oranı bulunmuştur.

Tablo 7.5'te neme karşı duyarlılık deneylerine ilişkin tasarım değişkenleri; Tablo H.1 ve Tablo H.2'de de asfalt film kalınlığına bağlı hesaplanmış ortalama indirekt çekme gerilmesi değerleri verilmektedir.

Tablo 7.5 Deneysel tasarım değişkenleri

Bitümlü Bağlayıcı Tipi		PG 64-22
Agrega Cinsi		Kireçtaşı
Asfalt Film Kalınlığı	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları	$6\mu - 7\mu - 9\mu - 11\mu - 13\mu$
	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları	$4.9\mu - 5.8\mu - 7.7\mu - 9.6\mu - 11.4\mu$
Numune Özellikleri		Kuru ve Koşullandırılmış Numune
Hedeflenen Hava Boşluk Oranları		%7
Uygulanan Deneyler		İndirekt Çekme Deneyi
Deney Tekrarı		3

7.2.2 İndirekt Çekme Gerilmesi Deneyi Sonuçlarına İlişkin Modeller

Ekteki şekilde (Şekil H.1) asfalt film kalınlığına bağlı hesaplanmış kuru ve koşullandırılmış numunelerin ortalama indirekt çekme gerilmesi grafikleri verilmektedir. Eğriler üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve film kalınlığına bağlı olarak uygun modeller geliştirilmiştir. Elde edilen bağıntılar aşağıda verilmektedir.

$$ITS_{kuru} = 13.42h^2 - 349.47h + 2949.5 \quad R^2 = 0.996 \quad (7.32)$$

$$ITS_{koşullandırılmış} = 13.652h^2 - 328.93h + 2678. \quad R^2 = 0.987 \quad (7.33)$$

Bağıntılarda;

ITSkuru =Kuru numunelerin indirekt çekme gerilmesi, kpa

ITSkoşullandırılmış = Koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmesi, kpa

h =Asfalt filmi kalınlığı, μ

Sudan kaynaklanan bozulmalara ilişkin model eğrileri film kalınlıklarına bağlı olarak incelendiğinde, eğrinin 9.5-10.5 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9.5-10.5 μ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Bu durum, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde sudan kaynaklanan bozulma etkisinin arttığını, büyük değerlerde ise azaldığını göstermektedir.

Ayrıca asfalt film kalınlığına bağlı olarak koşullandırmış ve kuru numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerleri oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6 Kuru ve koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmeleri oranı

Absorbe Bağlayıcı Dikkate Alınarak Hesaplanan Asfalt Film Kalınlıkları (μ)	ITSkoşullandırılmış/ITSkuru
4.9	0.83
5.8	0.84
7.7	0.87
9.6	0.91
11.4	0.92

Tablodan da görüldüğü gibi asfalt film kalınlığı arttıkça bu oran artmakta, başka bir deyişle numunelerin suya karşı duyarlılıkları azalmaktadır.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bitümlü karışımlarda yaşlanma ve suya bağlı bozulmalar üzerinde asfalt film kalınlığının etkisinin incelenmesi ve optimum asfalt film kalınlığının saptanması bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır.

Bugüne kadar yapılmış olan çalışmalarda yaşlanma, yalnızca asfalt film kalınlığına bağlı olarak esneklik modülünün değişimi açısından incelenmiştir. Asfalt film kalınlığına bağlı olarak karışımların suya karşı duyarlılıkları ise araştırılmamıştır.

Çalışmada yaşlanma, asfalt film kalınlığı ile birlikte hava boşluk oranına bağlı olarak esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi değişimi açısından incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmaların ilk bölümünde farklı asfalt film kalınlıkları (4.9μ , 5.8μ , 7.7μ , 9.6μ ve 11.4μ) ile düşük (%3-%5) ve yüksek (%6-%7) hava boşluk oranına sahip, kısa (135°C , 4 saat) ve uzun dönem (85°C , 120 saat) yaşlandırılmış numunelerin esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmeleri arasında regresyon analizleri yapılmıştır.

Çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1- Aynı boşluk oranı ve aynı asfalt film kalınlıklarına sahip numunelerin yaşlandırılma süreleri (yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış) ile esneklik modülleri ve indirekt çekme gerilmesi değerleri arasındaki ilişki Şekil D.1-D.5 ve Şekil E.1-E.5'te verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi bitümlü karışımların yaşlandırılma süreleri arttırıldıkça, esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi değerleri artmaktadır. Bu durum, esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi değerlerinin artmasının, yaşlanmanın bir göstergesi olarak kabul edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.
- 2- Hava boşluğunun numunelerin yaşlanma özelliklerine etkisini incelemek amacıyla film kalınlığına bağlı olarak indisler tanımlanmıştır (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , B_1 , B_2 , B_3 , B_4). Bu indisler deney başlangıç koşullarını referans almaktadır. Hesaplanan bu indis değerleri incelendiğinde (Tablo 7.3 ve Tablo 7.4); yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin, düşük hava boşluk

oranlarına sahip numunelere kıyasla yaşlanmanın etkilerine daha duyarlı oldukları görülmektedir ($A_2 > A_1$, $A_4 > A_3$, $B_2 > B_1$, $B_4 > B_3$)

- 3- Esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde (Şekil F.1- Şekil F.2 ve Şekil G.1-Şekil G.2), 9-10 μ 'luk film kalınlıklarının bir özellik taşıdığı; eğrinin 9-10 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9-10 μ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Başka bir deyişle, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde yaşlanmanın etkisi artmakta, büyük değerlerde ise yaşlanmanın etkisi değişmemektedir. Bu durum, 9-10 μ 'luk film kalınlığının optimum değer olarak kabul edilmesinin uygun olduğunu göstermektedir. Kandhal ve Chakraborty (1996) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuç elde edilmiştir.
- 4- Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış, düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri ile yaşlandırılmamış, düşük ve yüksek hava boşluk oranlarına sahip numunelerin esneklik modülü değerleri oranı, film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde (Tablo 7.2), film kalınlığının artışı ile numunelerin esneklik modülü oranlarının azaldığı görülmektedir. Bu durum, film kalınlığı artışı ile karışımın yaşlanmaya karşı duyarlılığının azaldığını göstermektedir.
- 5- 9-10 μ olarak belirtilen optimum asfalt film kalınlığı aralığına karşılık gelen bağlayıcı yüzdesi Tablo 6.12'den %5.1 ve %5.5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Yollar Fenni Şartnamesi'nin aşınma tabakaları için esas aldığı tasarım ölçütlerine (%4-%7) uygundur.
- 6- Esneklik modülü ve indirekt çekme gerilmesi deneyleri sonuçlarından farklı boşluk oranları (düşük, yüksek) ve değişik yaşlandırılma süreleri için (yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış) film kalınlığına bağlı olarak elde edilen bağıntıların regresyon katsayıları incelendiğinde, indirekt çekme gerilmesi değerlerine ilişkin katsayıların ortalama 0.99 (formül 7.17-7.21); esneklik modülüne ilişkin katsayıların ortalama 0.98 (formül 7.5-7.10) olduğu görülmektedir. Bu durum asfalt film kalınlığı ile kısa ve uzun dönem yaşlanma olayının, esneklik modülü deneyine kıyasla, indirekt çekme deneyi ile daha iyi modellendiğini göstermektedir.

- 7- Aynı asfalt film kalınlığına sahip numunelerin kısa dönem yaşlanma ile uzun dönem yaşlanma özellikleri arasında çok sıkı bir ilişki olduğu ($R^2 \sim 1$) regresyon analizi sonucunda ortaya çıkmıştır (Şekil F.3 - Şekil F.4 ve Şekil G.3 - Şekil G.4). Bu durum film kalınlığının, karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde benzer biçimde etkisi olduğunu göstermektedir.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde, sabit hava boşluğunda (%7) ve farklı film kalınlıklarında (4.9 μ , 5.8 μ , 7.7 μ , 9.6 μ ve 11.4 μ) hazırlanan karışımların suya karşı duyarlılıkları değerlendirilmiştir. Bu amaçla, koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerinin, kuru numunelerin indirekt çekme gerilmesi değerlerine oranları saptanmış ve film kalınlığına bağlı olarak regresyon analizleri yapılmıştır.

Çalışmaların bu bölümünde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sudan kaynaklanan bozulmalara ilişkin model eğrileri film kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde, koşullandırılmış numunelerin indirekt çekme mukavemetlerinin, kuru numunelerin indirekt çekme mukavemetlerine oranı film kalınlığı artışı ile artmaktadır. Bu durum, asfalt film kalınlığı artışı ile karışımların suya karşı duyarlılıklarının azaldığını göstermektedir. 0.83 ile 0.92 arasında değişen bu oranlar Superpave Şartnamesi'nin belirttiği 0.80 sınırının üstünde kalmaktadır (Tablo 7.6).
- Kuru ve koşullandırılmış numunelere ilişkin esneklik modülü model eğrileri film kalınlıklarına bağlı olarak incelendiğinde (Şekil H.1), 9.5-10.5 μ 'luk film kalınlıklarının bir özellik taşıdığı; eğrinin 9.5-10.5 μ 'nun altındaki kalınlıklarda dikleştiği, 9.5-10.5 μ 'dan büyük kalınlıklarda ise yatıklaştığı gözlenmiştir. Bu durum, belirtilen film kalınlığından küçük değerlerde sudan kaynaklanan bozulma etkisinin arttığını, büyük değerlerde ise azaldığını göstermektedir.

Bu çalışma, yalnızca bir çeşit agrega ve bağlayıcı kullanımı ile ilgili sonuçları kapsamaktadır. Bu konudaki araştırmalar, yaşlanma ve suya karşı duyarlılık olaylarının hem agrega hem de karışım özellikleri tarafından etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle farklı mineorolojik kökenli agrega, gradasyon, yüzey yapısı ve farklı özellikteki bitümlü bağlayıcı kullanılarak çalışma kapsamının geliştirilmesi gereklidir. Diğer taraftan yaşlanma sonunda esneklik modülünün

artması, kaplamanın yorulmaya ve termal çatlaklara karşı duyarlılığını arttırdığından adı geçen konuların araştırılmasında yarar vardır.



KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993. *AASHTO Guide for design of pavement structures American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC.
- Abson, G. and Burton, C., 1966. Investigation of failures in bituminous surfacing, *Journal of the Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **35**, 22-35.
- Ağar, E., 1975. Bitümlü kaplamalarda kullanılan asfalt çimentolarının çekme dirençlerinin incelenmesi, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aschenbreher, T. and Gennis, R.B. and Terrel, R.L., 1995. Comparison of several moisture susceptibility tests to pavement of known field performance, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **64**, 14-22.
- Asphalt Institute, 1996. Asphalt institute manual series for asphalt concrete and other hot mix types, **MS-2**, Lexington, Kentucky.
- Asphalt Institute Superpave Series No.1, 1996. Performance graded asphalt binder specification testing, **SP-1**, Lexington, Kentucky.
- Asphalt Institute Superpave Series No.2, 1996. Superpave level 1 mix design, **SP-2**, Lexington, Kentucky.
- ASTM, 1994. Annual Book of ASTM Standards *ASTM*, Philadelphia, PA.
- Barksdale, R.D., Alba, J. Khosla, N.P. and Rahman, M.S., 1998. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement device, NCHRP Final Report, National Research Council, Washington D.C.
- Bell, C.A., 1989. Aging of asphalt aggregate systems, *Summary Report*, **SR-OSU-A-003A-89-2**, Oregon State University.
- Bell, C.A., Wahab, A.Y., Cristi, M.E. and Sosnovske, D., 1994a. Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures, **SHRP-A-383**, National Research Council Washington D.C.

- Bell, C.A., Sosnovske, D. and Wiedner J.A., 1994b.** Aging, binder validation, **SHRP-A-384**, National Research Council Washington D.C.
- Bell, C.A., Wiedner J.A. and Fellin, J.M., 1994c.** Laboratory aging of asphalt aggregate mixtures, **SHRP-A-390**, National Research Council Washington D.C.
- Bikerman, J.J., 1966.** Adhesion of asphalt to stone, *Journal of Materials*, **1**, 34-47.
- Blokker, P.C. and Von Hoom, H., 1959.** Durability of bitumen in theory and practice, *Proceedings of the V.th World Petroleum Congress*, New York, USA, June 1959, 141-157.
- Bonnot, J., 1986.** Asphalt aggregate mixtures, *Transportation Research Record* **1096**, 22-29.
- Brock, J.D., 1986.** Oxidation of asphalt, *ASTEC Industries Technical Bulletin*, **T-103**, USA.
- Brown, S.F., 1980.** An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements, Department of Civil Engineering, University of Nottingham Press, England.
- Brown, S.F., 2001.** Practical test procedures for mechanical properties of bituminous materials, *Journal of the Institution of Civil Engineers*, **111**, 289-297.
- Campan, W.H., Smith, J.R., Mertz, L.R. and Erickson, L.G., 1959.** The relationship between voids, surface area, film thickness and stability in bituminous paving mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **28**, 149-157.
- Cominsky, J.R., Killingsworth, M.B., Anderson, M.R. and Crockford, W., 1998.** Quality control and acceptance of Superpave designed hot mix asphalt, Transportation Research Board, **NCHRP 409**, National Research Council, Washington D.C.
- Dow, A.W., 1903.** Asphalt experiments at Washington, *Engineering News Record* **47**, 18-25.
- Edler, A.C., Craus, J. and Mc. Kenzie, D., 1985.** Use of aging tests to determine the efficiency of hydrated lime to asphalt in retarding its oxidative hardening, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **54**, 118-139.

- Fink, D.F. and Griffin, R.L.**, 1961. Measurement of the consistency of paving cements with sliding plate viscometer, *Special Technical Publication*, **309**, 148-157.
- Fromm, J.M.**, 1974. The Mechanism of asphalt stripping from aggregate surfaces, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **43**, 191-219.
- Griffin, R.L., Miles, T.K. and Penther, C.J.**, 1955. Microfilm durability test for Asphalt, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **24**, 31-42.
- Goode F.J. and Lufsey, A.L.**, 1965. Voids, permeability and film thickness vs. asphalt hardening, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **34**, 430-438.
- Graf, E.P.**, 1986. Factors effecting moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **57**, 68-75.
- Gzemski, J.C.**, 1970. Factors efecting adhesion of asphalts to stone, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **39**, 571-605.
- Hattie, R.L.**, 1983. Estimating the durability of chem-crete modified paving asphalt, Special Report, Alaska Department of Transportation, Alaska, USA.
- Heithaus, J.J. and Johnson, R.W.**, 1958. A Micro viscometer study of road asphalt hardening in the field and laboratory, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **27**, 571-605.
- Heitzman, M.**, 1997. Control of Aphaltic Concrete Mixtures, Iowa Department of Transportation, USA.
- Her Majesty's Stationery Office (HMSO)**, 1962. Bituminous Materials in Road Construction, Oxford Press, London.
- Huang, S. and Branthaver, J.F.**, 998. Effect of film thickness on the rheological properties of asphalt in contact with aggregate surface, *Transportation Research Record*, **1968**, 31-47.
- Huber, A.G.**, 1996. Heritage Research, Development of the Superpave Gyratory Compactor, Indianapolis, Indiana.

- Hugo, F. and Kennedy T.W.**, 1985. Surface cracking of asphalt mixtures in South Africa, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **54**, 454-501.
- Hunter, N.R.**, 1994. Bituminous Mixtures in Road Construction, Thomas Telford Services Ltd, London.
- Hveem, F.N., Zube, E. and Skog, J.**, 1963. Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **32**, 247-327.
- Isaccson, U. and Zeng, H.**, 1997. Relationship bitumen chemistry and low temperature behavior of Asphalt, Division of Highway Engineering, Final Report, Kungl Tekniska Hogskolan Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Isaccson, U., Vinson, T.S. and Zeng, H.**, 1997. The influence of material factors on the low temperature cracking of asphalt paving mixtures, *Proceedings of the Fifth International Rilem Symposium*, France, May 1997, 122-135.
- Ishai, I.**, 1987. A suggested methodology for the analysis of asphalt age hardening, *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, *JTEVA* **5**, 3-16.
- Jones, R.D.**, 1999. Understanding how the origin and composition of paving grade asphalt cements affect their performance, *SHRP Technical Memorandum*, **4**, 1258-1276.
- Kandhal, P. and Chakraborty, S.**, 1996. Effect of asphalt film thickness on the short and long term aging of asphalt paving mixtures, National Research for Asphalt Technology, *Transportation Research Board*, **22**, 45-68.
- Kandhal, P., Foo, K.Y. and Mallick, R.**, 1998. Critical review of voids in Superpave, *Transportation Research Record*, **1609**, 228-239.
- Karayolları Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı**, 2002. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yapım Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Kemp, G.R. and Predoehl, N.H.**, 1981. A Comparison of field and laboratory environments on asphalt durability, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **50**, 492-537.

- Kennedy, T.W., Roberts, F.L. and Lee, K.W., 1982. Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using Texas freeze-thaw pedestal test, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **51**, 571-605.
- Kennedy, T.W., Roberts, F.L. and Lee, K.W., 1984. Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas boiling test, *Transportation Research Record*, **968**, 45-63.
- Kennedy, T.W., 1989. Use of hydrated lime in asphalt paving mixtures, National Lime Association, **325**, 1-12.
- Kennedy, T.W., Huber, A.G., Harrigan, E. and Cominsky, J.R., 1997. Superior asphalt pavements. *The Product of the SHRP*. The Asphalt Research Team. SHRP-A-410, National Research Council, Washington D.C.
- Kim, O.K., Bell, C.A., Wilson, J. And Boyle, G., 1986. Effect of moisture and aging on asphalt pavement life, Effect of aging, FHWA OR-RD-86-01-2, Oregon Department of Transportation and the Federal Highway Administration.
- Kumar, A. and Goetz, W.H., 1977. Asphalt hardening as affected by film thickness, voids, permeability in asphaltic mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **46**, 571-605.
- Lee, D.Y., 1968. Development of laboratory durability test for asphalts, *Highway Research Board*, **23**, 34-49.
- Lee, D.Y., 1973. Asphalt durability correlation in Iowa, *Highway Research Record*, **468**, 43-60.
- Lewis, R.H. and Welborn, J.Y., 1940. Report on the properties on the residues of 50-60 and 85-100 Penetration asphalts from oven tests and exposure, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **11**, 86-157.
- Lottman, H., 1982. Predicting moisture induced damage to asphalt concrete, NCHRP-246, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Lubbers, H.E., 1985. Bitumen in De Wegen Waterbauw, Nederlands.
- Mack, C., 1957. Physical properties of asphalt in thin films, *Ind. Eng. Chemistry*, **49**, 422-427.

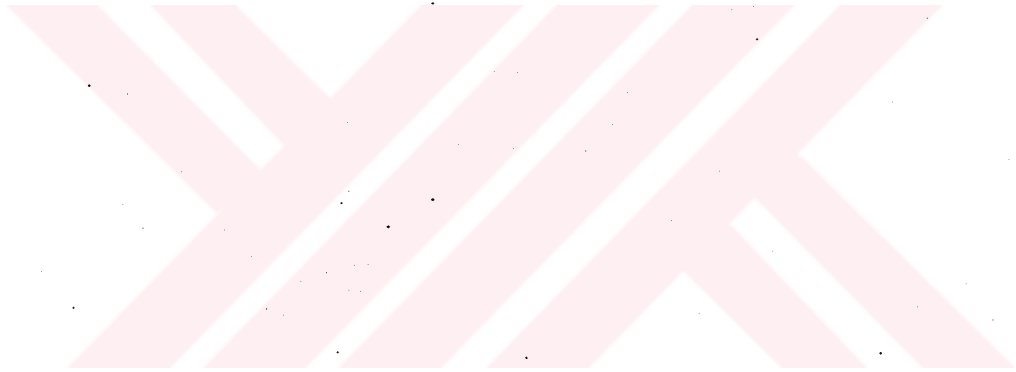
- Mack, C.**, 1964. Physical chemistry bituminous materials, *Asphalt, Tars and Pitches*, I. Interscience Publishers, New York.
- Majidzadeh, K.**, 1968. The effect of water on bitumen aggregate mixtures, Highway Research Board, **98**, 125-132.
- Matheus, D.H.**, 1958. Adhesion in bituminous road materials, a survey of present knowledge, *Journal of Institute of Petroleum*, **44**, 423-432.
- Monismith, C.L.**, 1961. Asphalt paving mixtures properties design and performance, The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California Berkeley, USA.
- Moultier, R.**, 1977. Utilization and possibilities of the gyratory shear compacting press, Liaison Bulletin of the Bridge and Road Laboratories, France.
- Nicholson, V.**, 1937. A laboratory oxidation test for asphaltic bitumen, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **9**, 208-214.
- Önal, A.M. ve Kahramangil, M.**, 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Pauls, J.T. and Welborn J.Y.**, 1952. Studies of the hardening properties of asphaltic materials, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **21**, 48-75.
- Pell, P.S.**, 1988. Bituminous Pavements, Materials, Design and Evaluation, University of Nottingham, England.
- Petersen, J.C.**, 1984. Chemical composition of asphalts related to asphalt durability, *Transportation Research Record*, **999**, 13-30.
- Petersen, J.C.**, 1989. A thin Film accelerated aging test for evaluating asphalt oxidative aging, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **58**, 187-195.
- Petersen, J.C.**, 1993. effect of physicochemical factors on asphalt oxidation kinetics, *Transportation Research Record*, **1391**, 1-11.
- Plancher, H., Green, E.L. and Peterson J.C.**, 1976. Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **45**, 1-24.

- Planceher, H., Dorrence, S.M. and Petersen, J.C., 1977.** Identification of chemical types in asphalts strongly absorbed at the asphalt-aggregate interface and their relative displacement by water, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **46**, 151-175.
- Rice, J.M., 1959.** Relationship of aggregate characteristics to the effect of water on bituminous paving mixtures in *ASTM Special Technical Publication*, **240**, 17-34, American Society for Testing Materials, Pennsylvania.
- Santucci, L.E., Goodrich, J.E. and Sunberg, J.E., 1981.** The effect of crude source and additives on the long term oven aging of paving asphalts, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **50**, 560-571.
- Schmidt, R.L. and Santucci, L.E., 1969.** The effect of asphalt properties on the fatigue cracking of asphalt concrete on the Zaca-Wigmore test project, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **38**, 39-64.
- Scholz, T.V. and Brown, S.F., 1996.** Rheological characteristics of bitumen in contact with mineral aggregate, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **65**, 357-384.
- SHRP-A-341, 1993.** Fundamental properties of asphalt aggregate interactions including adhesion and absorption, **SHRP A-341**, National Council, Washington D.C.
- SHRP-A-415, 1994.** Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes, **SHRP A-415**, National Council, Washington D.C.
- SHRP-A-417, 1994.** Accelerated performance related tests for asphalt aggregate mixes and their use in mix design and analysis system, **SHRP A-417**, National Council, Washington D.C.
- Simpson, W.C., 1960.** Asphalt in the Encyclopedia of Chemistry, Reinhold Publishing Corp, USA.
- Stock, A.F. and Arand, W., 1993.** Low temperature cracking in polymer modified binders, *Association of Asphalt Paving Technologist*, **62**, 23-53.
- Stuart, K.D., 1990.** Moisture damage in asphalt mixtures, A State of Art Report, Research Development and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center.

- Swailmi, S.A. and Terrel R.L.,** 1993. Evaluation of the environmental conditioning system (ECS) and comparison with AASHTO T 283, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **62**, 247-253.
- Tandon, V., Vemuri, N. And Nazarian, S.,** 1996. Evaluation of environmental conditioning system for predicting moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Board*, **21**, 1254-1269.
- Terrel, L.R. and Swailmi, A.S.,** 1987. Water sensitivity of asphalt-aggregate Mixes, test selection, **SHRP-A-403**, National Council, Washington D.C.
- Thelen, A. ,** 1958. Surface Energy and Adhesion Properties in Asphalt Aggregate Systems, The Franklin Institute, Philadelphia, PA.
- Tia, M., Ruth, C.T., Charai, J.M., Richardson, D. and Williams, J.,** 1988. Investigation of original and in-service asphalt properties for the development of improved specifications, final phase of testing and analysis, Final Report, University of Florida.
- Topal, A.,** 2001. Fine aggregate angularity in Turkey, *Yüksek Lisans Tezi*, DEU Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Traxler, R.N.,** 1961. Relation between asphalt composition and hardening by volatilization and oxidation, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **30**, 359-377.
- Traxler, R.N.,** 1963. Durability of asphalt cements, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **32**, 44-58.
- Tuffour, Y.A., Ishai, I. and Craus, J.,** 1989. Related asphalt aging and durability to its compositional changes, *Transportation Research Board*, **58**, 163-169.
- Tunç, A.,** 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Kitapevi, İstanbul.
- Uluçaylı, M.,** 1976. The identification of failures in asphaltic concrete pavements, *Cento Seminar on the Maintenance and Improvements of Highways*, Islamabad, Pakistan, 17-19 October, 198-206.
- Uluçaylı, M.,** 1998. Bitümlerde oksidasyon sorunu, *İsfalt Yol Kültürü*, **3**, 175-185..
- Valleggra, B.A.,** 1981. Pavement deficiencies related to asphalt durability, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **50**, 481-491.
- Verstraeten, J.,** 1994. Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting, PIARC Technical Committee, Belgium.

- Von Quintas, H., Scherocman, J., Kennedy, T.W. and Hughes, C.S., 1988. Asphalt aggregate mixture analysis systems, Final Report to NCHRP.
- Voyutsky, S., 1978. Collid Chemistry, MIR Publishers, Moskow.
- Welborn, J.Y., 1979. Relationship of asphalt cement properties to pavement durability, *National Cooperative Highway Research Program*, 99, 41-57.
- Witczak, M.W., 1999. Volumetric design of standard mixtures used by the University of Maryland, Superpave Support and Performance Models Management Team Technical Report.
- Yollar Türk Milli Komitesi, 1997. Bitümlü Karışımların Tasarımında Yeni Gelişmeler, Ankara.
- Zeng, H., 1995. On the low temperature cracking of asphalt pavements, *Report Presented in the Department of Infrastructure and Planning Division of Highway Engineering, TRITA-IP FR 95-07*, Royal Institute of Technology, Sweden.

EKLER



EK A**Tablo A.1 Sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların hava boşluk yüzdeleri**

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Yaşlandırılmamış Düşük Hava Boşluklu	1A	300	3.09	2.575	4.9
	1B	300	3.09	2.575	4.7
	2A	300	3.58	2.555	4.3
	2B	300	3.58	2.555	4.3
	3A	165	4.56	2.517	3.9
	3B	165	4.56	2.517	3.6
	4A	75	5.51	2.481	4.3
	4B	75	5.51	2.481	4.1
	5A	40	6.45	2.446	3.9
	5B	40	6.45	2.446	3.7

Tablo A.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Yaşlandırılmamış Yüksek Hava Boşluklu	1A	140	3.09	2.575	7.1
	1B	140	3.09	2.575	7.2
	2A	100	3.58	2.555	6.7
	2B	100	3.58	2.555	6.8
	3A	60	4.56	2.517	6.9
	3B	60	4.56	2.517	7.0
	4A	30	5.51	2.481	6.7
	4B	30	5.51	2.481	6.5
	5A	17	6.45	2.446	6.5
	5B	17	6.45	2.446	6.3

Tablo A.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Kısa Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu	1A	300	3.09	2.575	4.6
	1B	300	3.09	2.575	4.5
	2A	300	3.58	2.555	3.9
	2B	300	3.58	2.555	4.1
	3A	165	4.56	2.517	3.3
	3B	165	4.56	2.517	3.4
	4A	75	5.51	2.481	3.3
	4B	75	5.51	2.481	3.0
	5A	40	6.45	2.446	3.0
	5B	40	6.45	2.446	3.3

Tablo A.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Kısa Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu	1A	140	3.09	2.575	6.3
	1B	140	3.09	2.575	6.0
	2A	100	3.58	2.555	6.5
	2B	100	3.58	2.555	6.3
	3A	60	4.56	2.517	6.2
	3B	60	4.56	2.517	6.1
	4A	30	5.51	2.481	5.9
	4B	30	5.51	2.481	6.1
	5A	17	6.45	2.446	6.3
	5B	17	6.45	2.446	6.3

Tablo A.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Uzun Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu	1A	300	3.09	2.575	4.4
	1B	300	3.09	2.575	4.6
	2A	300	3.58	2.555	3.3
	2B	300	3.58	2.555	3.5
	3A	165	4.56	2.517	3.1
	3B	165	4.56	2.517	3.2
	4A	75	5.51	2.481	3.1
	4B	75	5.51	2.481	3.1
	5A	40	6.45	2.446	3.0
	5B	40	6.45	2.446	3.1

Tablo A.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Yoğurmalı Pres Kalıbının Dönüş Sayısı	Bitümlü Bağlayıcı Oranı (%)	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (G_{mm})	Hava Boşluk Oranı (V_a) (%)
Uzun Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu	1A	140	3.09	2.575	6.7
	1B	140	3.09	2.575	6.5
	2A	100	3.58	2.555	6.4
	2B	100	3.58	2.555	6.2
	3A	60	4.56	2.517	6.4
	3B	60	4.56	2.517	6.1
	4A	30	5.51	2.481	6.1
	4B	30	5.51	2.481	6.0
	5A	17	6.45	2.446	6.5
	5B	17	6.45	2.446	6.3

EK B



Tablo B.1 Yaşlandırılmamış, düşük boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon *10 ⁻³ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort) MPa	Esneklik Modülü (ort) MPa
1A	0	6	4.9	4.9	14	300	128	5505	5442	5654
1A	90			4.9			131	5379		
1B	0			4.7			118	5938		
1B	90			4.7			121	5792		
2A	0	7	5.8	4.3	11	265	133	4629	4578	4504
2A	90			4.3			136	4527		
2B	0			4.3			135	4511		
2B	90			4.3			140	4350		
3A	0	9	7.7	3.9	10	230	134	3294	3236	3415
3A	90			3.9			170	3178		
3B	0			3.6			151	3617		
3B	90			3.6			153	3570		
4A	0	11	9.6	4.3	9	200	145	3204	3130	3160
4A	90			4.3			152	3058		
4B	0			4.1			144	3244		
4B	90			4.1			149	3156		
5A	0	13	11.4	3.9	8	170	130	3021	2977	2961
5A	90			3.9			134	2932		
5B	0			3.7			129	3012		
5B	90			3.7			135	2879		

Tablo B.2 Yaşlandırılmamış, yüksek boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon 10 ⁻⁶ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort) MPa	Esneklik Modülü (ort) MPa
1A	0			7.1			122	4309		
1A	90			7.1			125	4206		4165
1B	0	6		7.2	10	230	126	4151		
1B	90			7.2			131	3992	4071	
2A	0			6.7			129	3802		
2A	90			6.7			133	3688		3601
2B	0	7		6.8	9	210	136	3568		
2B	90			6.8			145	3346	3457	
3A	0			6.9			134	3087		
3A	90			6.9			143	2893	2990	
3B	0	9		7.0	7	180	145	2823		2870
3B	90			7.0			153	2675	2749	
4A	0			6.7			124	2673		
4A	90			6.7			130	2549	2611	2677
4B	0	11		6.5	5	145	123	2709		
4B	90			6.5			120	2777	2743	
5A	0			6.5			123	2455		
5A	90			6.5			129	2341	2398	2335
5B	0	13		6.3	5	130	124	2409		
5B	90			6.3			140	2134	2272	

Tablo B.3 Kısa dönem yaşlandırılmış, düşük boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon *10 ⁻⁶ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort) MPa	Esneklik Modülü (ort) MPa
1A	0			4.6			121	8021		
1A	90			4.6			124	7826		
1B	0			4.5	17	420	119	8111		8011
1B	90	6	49	4.5			122	8086		8099
2A	0			3.9			121	6542		
2A	90			3.9			124	633		
2B	0			4.1	15	337	123	6365		6364
2B	90	7	5.8	4.1			127	6164		6265
3A	0			3.3			137	5263		
3A	90			3.3			153	4713		
3B	0			3.4	13	307	154	4657		4713
3B	90	9	7.7	3.4			170	4218		4438
4A	0			3.1			153	4288		
4A	90			3.1			163	4025		
4B	0			3.0	11	287	156	4251		4171
4B	90	11	9.6	3.0			161	4119		4185
5A	0			3.0			138	3349		
5A	90			3.0			135	3423		
5B	0			3.3	9	200	140	3318		3323
5B	90	13	11.4	3.3			145	3205		3262

Tablo B.4 Kısa dönem yaşlandırılmış, yüksek boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon *10 ⁻⁶ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort) MPa	Esneklik Modülü (ort) MPa
1A	0			6.3			131	6650		
1A	90			6.3			129	6754		
1B	0			6.0	15	375	126	6952		6800
1B	90	6	49	6.0			128	6844		
2A	0			6.5			127	5702		
2A	90			6.5			130	5570		
2B	0			6.3	14	310	128	5566		5569
2B	90	7	5.8	6.3			131	5439		
3A	0			6.2			149	4096		
3A	90			6.2			157	3887		
3B	0			6.1	11	267	141	4376		4168
3B	90	9	7.7	6.1			143	4314		
4A	0			5.9			130	3743		
4A	90			5.9			134	3631		
4B	0			6.1	12	214	136	3597		3616
4B	90	11	9.6	6.1			140	3494		
5A	0			6.3			131	3193		
5A	90			6.3	9	185	135	3099		3095
5B	0			6.3			138	3065		
5B	90	13	11.4	6.3			140	3021		

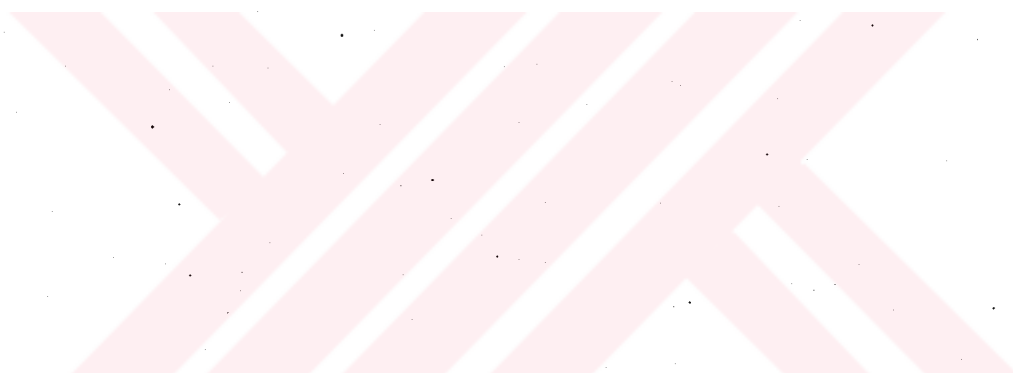
Tablo B.5 Uzun dönem yaşlandırılmış, düşük-boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon *10 ⁻⁶ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort) MPa	Esneklik Modülü (ort) MPa
1A	0			4.4			115	1111		
1A	90			4.4			118	10829		10970
1B	0			4.6	25	550	116	10897		
1B	90	6		4.6			120	10533	1015	
2A	0			3.3			120	8807		
2A	90	7		3.3	19	450	123	8593		8700
2B	0			3.5			125	8409		
2B	90			3.5			129	8149	8279	
3A	0			3.1			126	6531		
3A	90	9		3.1	15	360	130	6330	6431	
3B	0			3.2			124	608		
3B	90			3.2			127	6545	6629	6530
4A	0			3.1			125	5557		
4A	90	11		3.1	12	300	129	5403	5489	
4B	0			3.1			131	540		
4B	90			3.1			137	5172	5290	5389
5A	0			3.0			140	4505		
5A	90	13		3.0	12	270	147	4290	4438	
5B	0			3.1			156	4000		
5B	90			3.1			150	4159	4079	4238

Tablo B.6 Uzun dönem yaşlandırılmış, yüksek boşluk oranı ile sıkıştırılmış numunelerin esneklik modülü değerleri

Numune No	Numune Çevirme Durumu (°)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınmadan Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Absorbe Asfalt Dikkate Alınarak Hesaplanan Film Kalınlığı (μ)	Hava Boşluk Yüzdesi	P temas (lbs)	Pdevirsel (lbs)	Yatay Deformasyon *10 ⁻⁶ (inç)	Esneklik Modülü (MPa)	Esneklik Modülü (ort)- MPa	Esneklik Modülü (ort)- MPa
1A	0			6.7			122	9281		
1A	90			6.7			125	9058		
1B	0			6.5	20	490	118	9753		
1B	90	6	4.9	6.5			121	9512		9400
2A	0			6.4			131	7489		
2A	90			6.4			138	109		
2B	0			6.2	17	420	137	7321		
2B	90	7	5.8	6.2			141	7113		7258
3A	0			6.4			141	5602		
3A	90			6.4			146	5410		
3B	0			6.1	14	340	137	5859		
3B	90	9	7.7	6.1			141	5695		5642
4A	0			6.1			117	5162		
4A	90			6.1			120	5034		
4B	0			6.0	10	260	122	4845		
4B	90	11	9.6	6.0			126	4692		4934
5A	0			6.5			140	3756		
5A	90			6.5			148	3553		
5B	0			6.3	8	230	124	4218		
5B	90	13	11.4	6.3			130	4023		3887

EK C



Tablo C.1 Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış; düşük ve yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin indirekt çekme deneyi sonuçları

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Yaşlandırılmamış Düşük Hava Boşluklu	1A	4.9	958.86	1366.817	1397.43
	1B	4.7	1007.319	1428.042	
	2A	4.3	810.669	1143.013	1132.74
	2B	4.3	804.749	1122.466	
	3A	3.9	670.441	955.682	990.16
	3B	3.6	710.910	1024.630	
	4A	4.3	603.921	851.502	866.53
	4B	4.1	621.843	881.564	
	5A	3.9	463.589	654.312	733.26
	5B	3.7	588.459	816.394	

Tablo C.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Yaşlandırılmamış Yüksek Hava Boşluklu	1A	7.1	796.553	1105.092	1089.51
	1B	7.2	778.228	1073.927	
	2A	6.7	661.092	937.204	931.55
	2B	6.8	660.253	925.897	
	3A	6.9	542.120	756.148	745.19
	3B	7.0	532.059	734.223	
	4A	6.7	434.010	602.119	622.05
	4B	6.5	460.260	641.971	
	5A	6.5	401.179	565.646	577.51
	5B	6.3	422.544	589.364	

Tablo C.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Kısa Dönem Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu	1A	4.6	1215.36	1704.315	1721.07
	1B	4.5	1245.927	1737.824	
	2A	3.9	1035.433	1475.961	1454.38
	2B	4.1	1016.205	1427.904	
	3A	3.3	863.238	1230.507	1200.52
	3B	3.4	823.836	1170.523	
	4A	3.1	736.121	1021.251	1019.46
	4B	3.0	725.693	1017.666	
	5A	3.0	674.704	946.168	901.35
	5B	3.3	607.487	856.536	

Tablo C.1 (devamı)

Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Kısa Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu	1A	6.3	1097.52	1547.459	1575.94
	1B	6.0	1131.726	1604.41	
	2A	6.5	917.149	1300.213	1356.89
	2B	6.3	1013.452	1413.563	
	3A	6.2	790.293	1096.404	1116.61
	3B	6.1	8/10.560	1136.808	
	4A	5.9	700.337	966.438	956.58
	4B	6.1	682.397	946.719	
	5A	6.3	592.151	812.823	807.31
	5B	6.3	577.935	801.791	

Tablo C.1 (devamı)

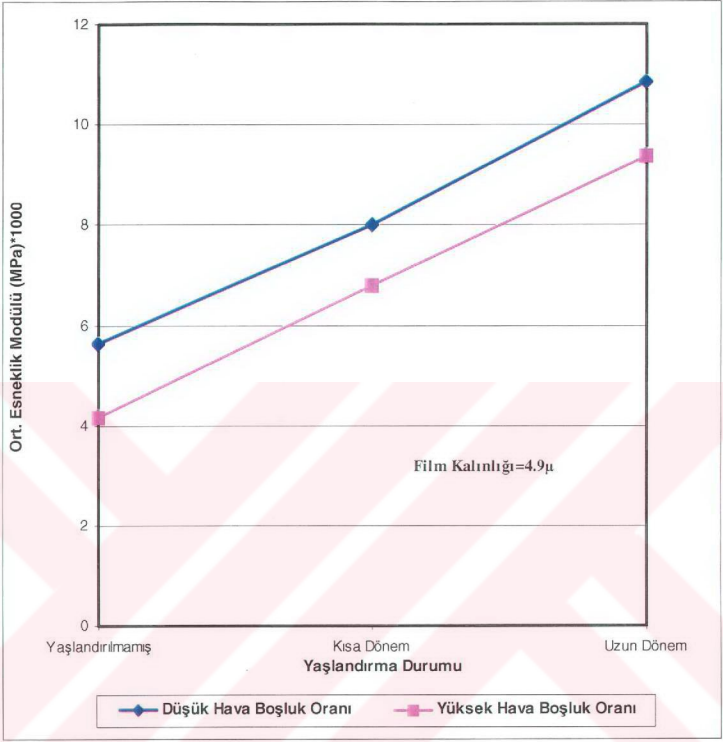
Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Uzun Yaşlandırılmış Düşük Hava Boşluklu	1A	4.4	1708.237	2408.545	2346.01
	1B	4.6	1637.136	2283.475	
	2A	3.3	1405.645	2003.685	1982.11
	2B	3.5	1382.925	1960.524	
	3A	3.1	1130.474	1568.35	1558.49
	3B	3.2	1104.32	1548.631	
	4A	3.1	885.438	1248.434	1240.09
	4B	3.1	859.362	1231.748	
	5A	3.0	792.062	1122.880	1120.61
	5B	3.0	797.474	1118.330	

Tablo C.1 (devamı)

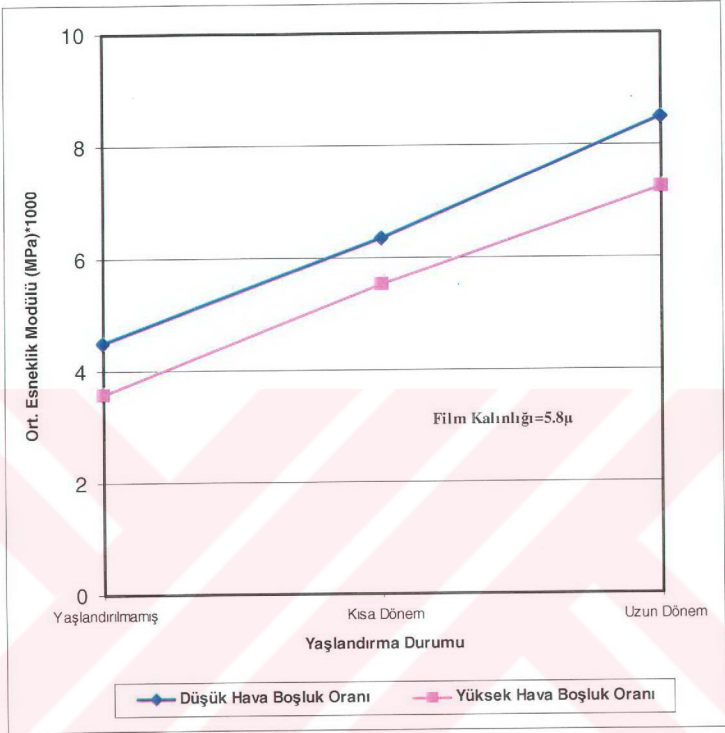
Yaşlandırma Durumu	Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Maksimum Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
Uzun Dönem Yaşlandırılmış Yüksek Hava Boşluklu	1A	6.7	1476.261	2070.22	2080.29
	1B	6.5	1466.445	2090.352	
	2A	6.4	1262.41	1789.672	1838.76
	2B	6.2	1302.557	1887.853	
	3A	6.4	1040.744	1467.411	1514.29
	3B	6.1	951.046	1363.162	
	4A	6.1	762.307	1074.824	1079.31
	4B	6.0	785.376	1083.787	
	5A	6.5	721.760	1001.326	983.12
	5B	6.3	699.235	964.921	

EK D

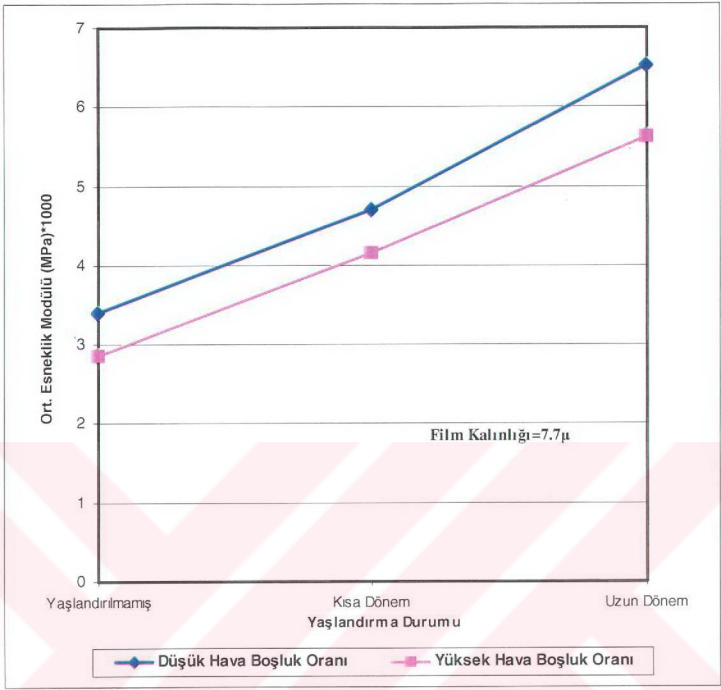




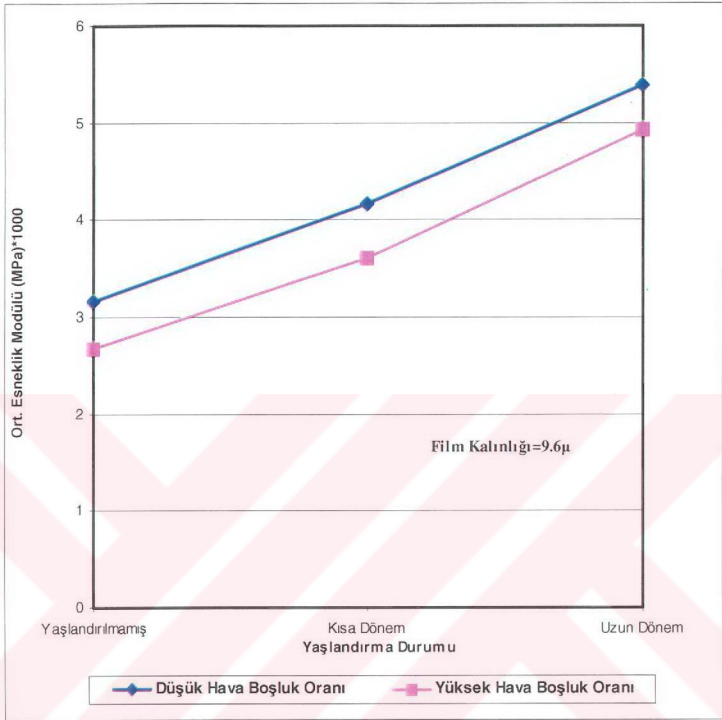
Şekil D.1 4.9μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi



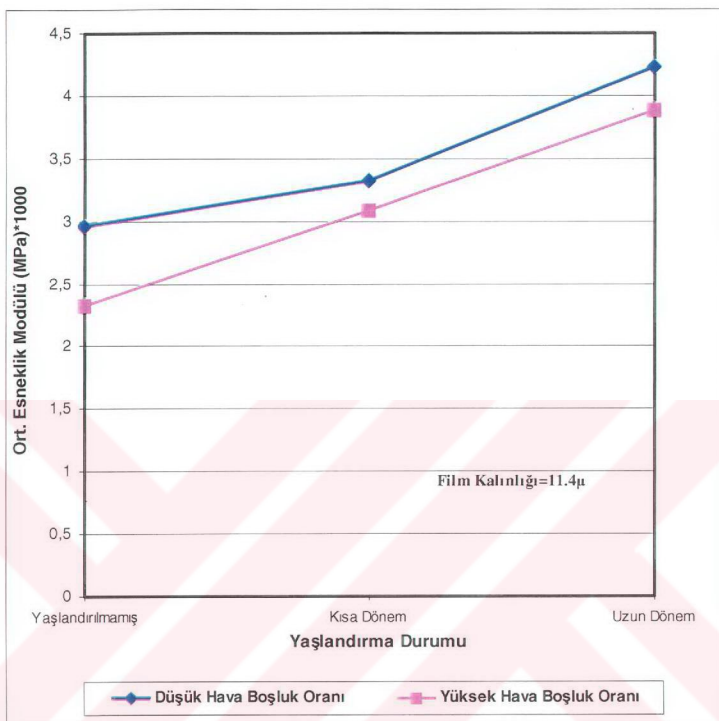
Şekil D.2 10 5.8μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi



Şekil D.3 7.7μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi



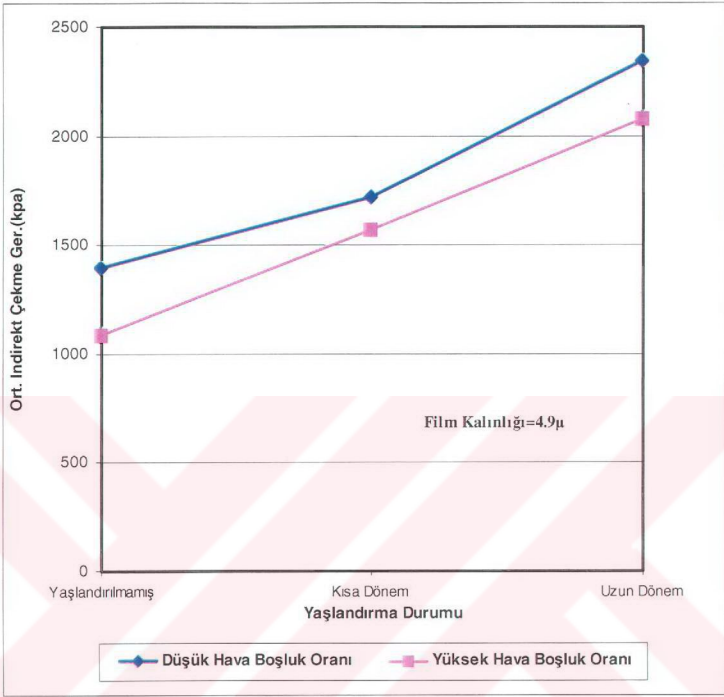
Şekil D.4 9.6μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi



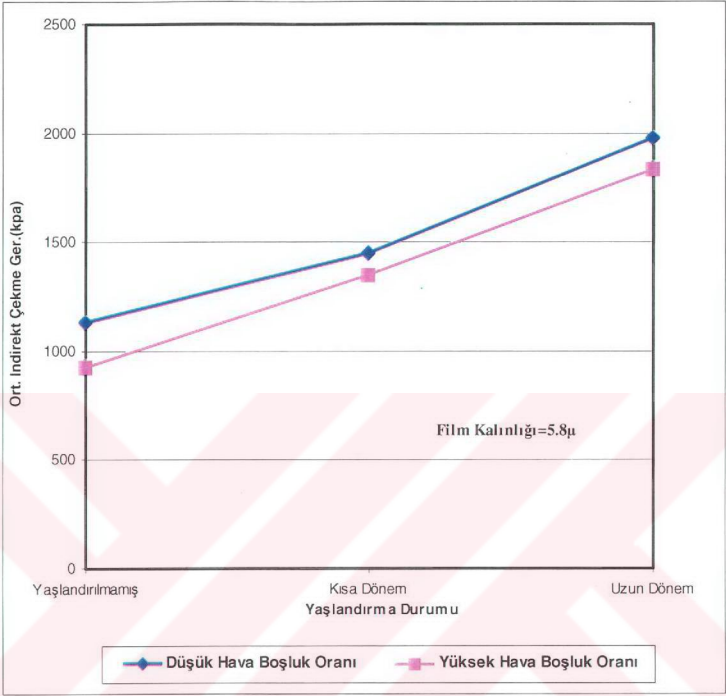
Şekil D.5 11.4μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-esneklik modülü ilişkisi

EKE

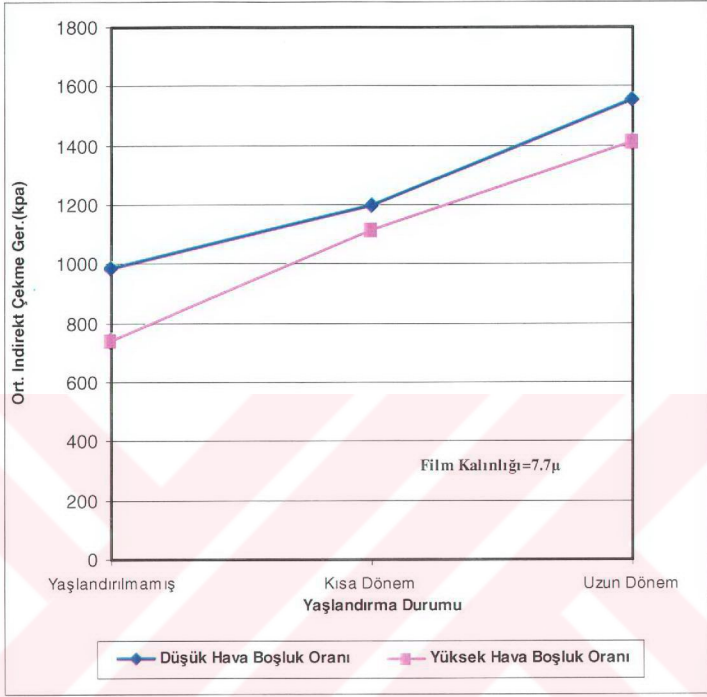




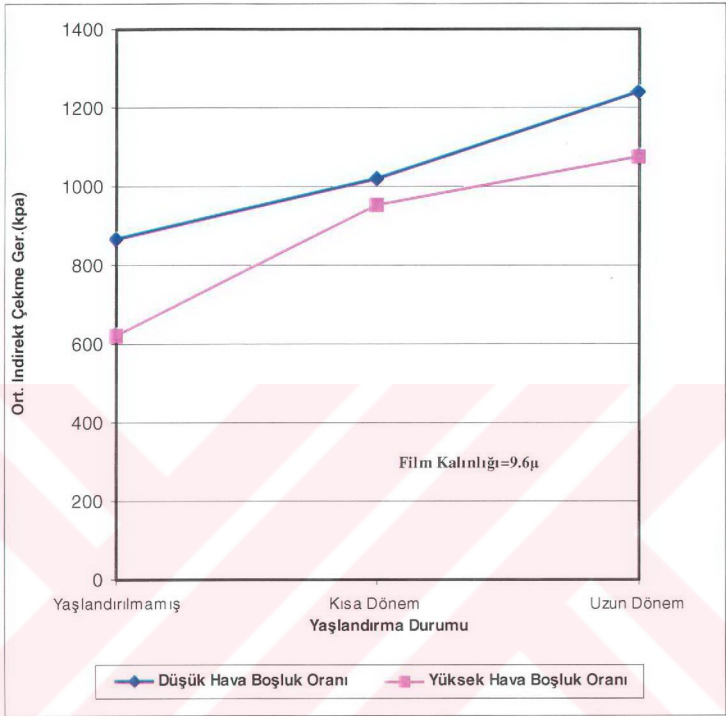
Şekil E.1 4.9μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi



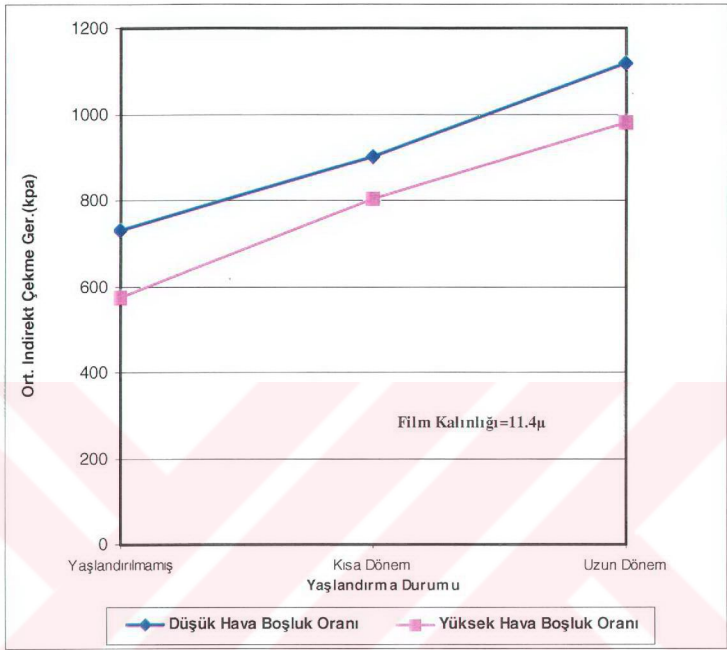
Şekil E.2 5.8μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi



Şekil E.3 7.7μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi



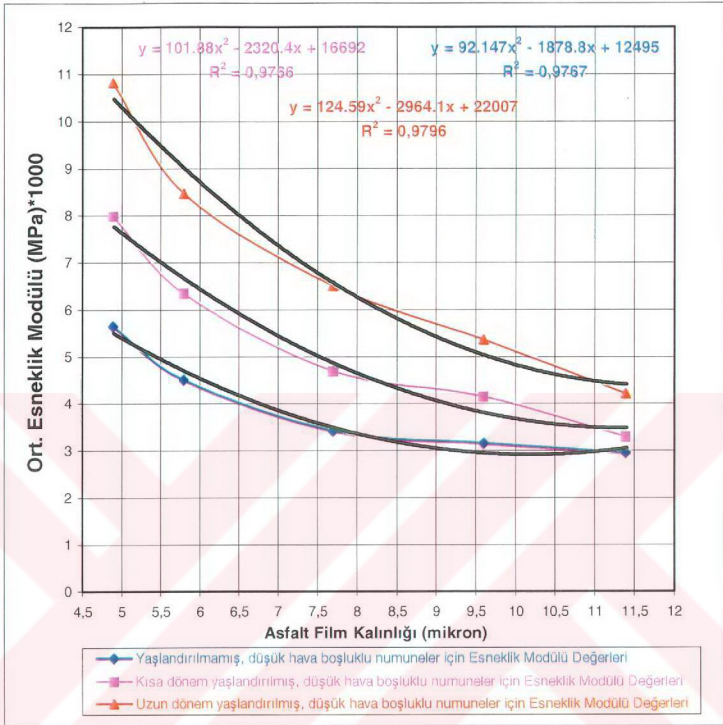
Şekil E.4 9.6μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi



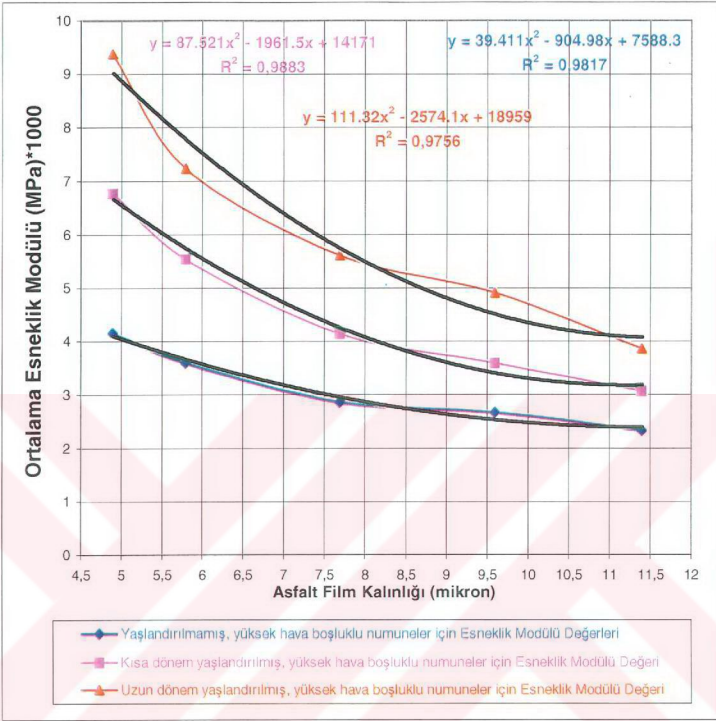
Şekil E.5 11.4μ asfalt film kalınlığı ile hazırlanan numuneye ait yaşlandırma durumu-indirekt çekme gerilme ilişkisi

EK F

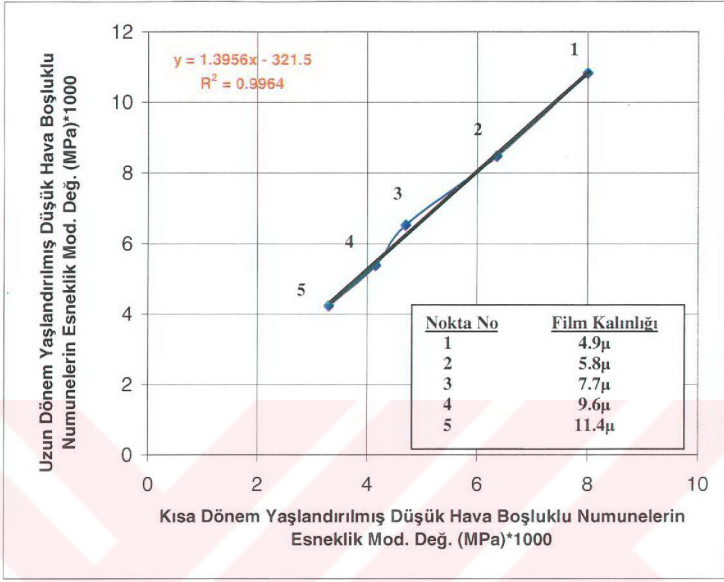




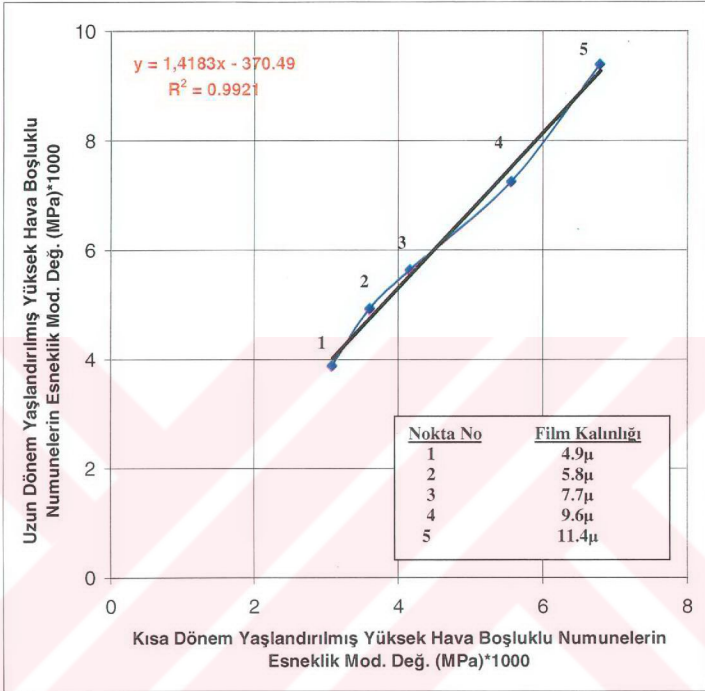
Şekil F.1 Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı-esneklik modülü ilişkisi



Şekil F.2 Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip numunelere ait film kalınlığı-esneklik modülü ilişkisi



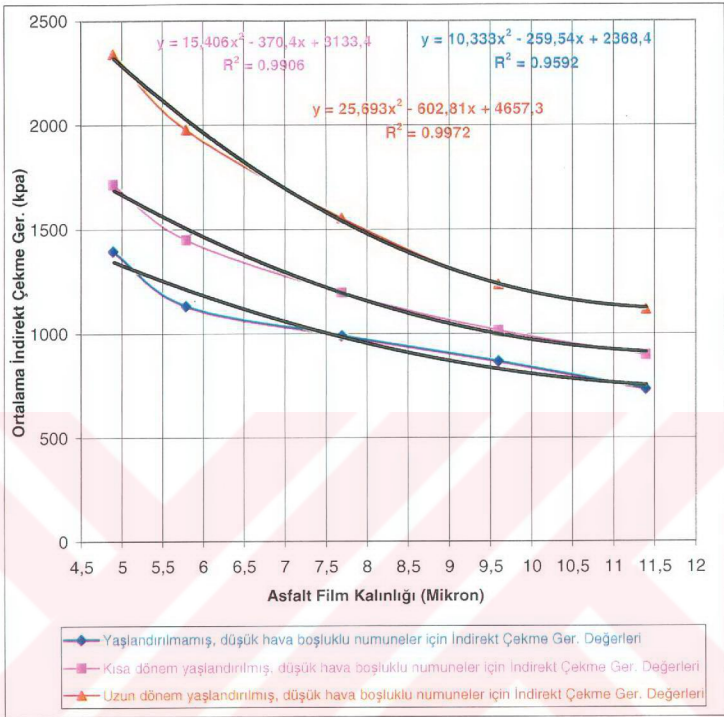
Şekil F.3 Düşük hava boşluğu oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem esneklik modülü ilişkisi (hava boşluk oranı %3-%5)



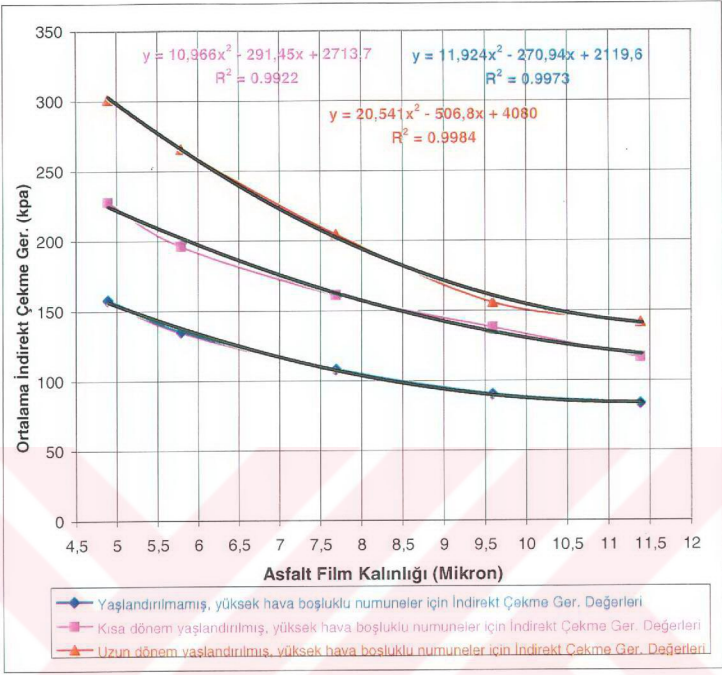
Şekil F.4 Yüksek hava boşluğu oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem esneklik modülü ilişkisi (hava boşluk oranı %6-%7)

EKG

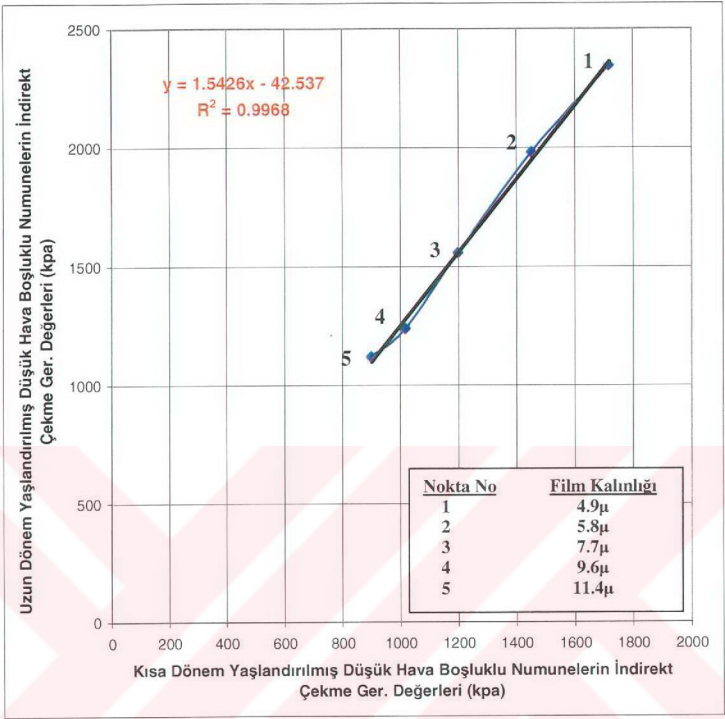




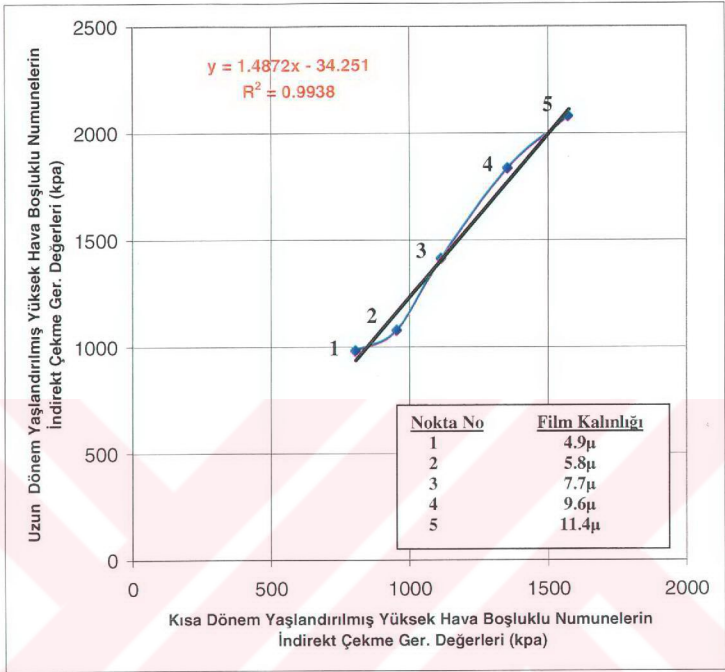
Şekil G.1 Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış düşük hava boşluk oranına sahip, numunelere ait film kalınlığı-indirekt çekme gerilme ilişkisi



Şekil G.2 Yaşlandırılmamış ve kısa dönem yaşlandırılmış yüksek hava boşluk oranına sahip, numunelere ait film kalınlığı-indirekt çekme gerilme ilişkisi



Şekil G.3 Düşük hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem indirekt çekme gerilmesi ilişkisi (hava boşluk oranı %3-%5)



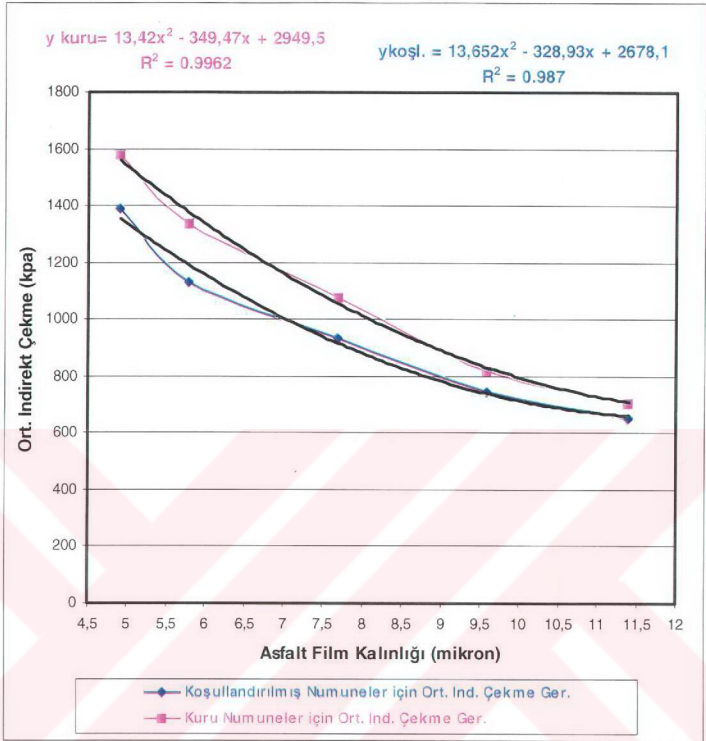
Şekil G.4 Yüksek hava boşluk oranına sahip numunelerin kısa ve uzun dönem indirekt çekme gerilmesi ilişkisi (hava boşluk oranı %6-%7)

EKH



Tablo H.1 Kuru numuneler üzerine uygulanan indirekt çekme gerilmesi deneyi sonuçları

Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Ortalama Hava Boşluğu Yüzdesi	Uygulanan Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
1A	6.8	6.9	1096.908	1555.05	1577.412
1B	7.0		1245.582	1683.05	
1C	7.0		1105.779	1494.14	
2A	6.9	7.1	997.383	1369.07	1339.603
2B	7.2		939.066	1262.30	
2C	7.3		1032.16	1387.44	
3A	6.5	6.7	814.956	1106.94	1079.846
3B	7.0		770.079	1057.06	
3C	6.7		795.98	1075.54	
4A	6.6	6.8	651.578	858.074	820.588
4B	7.0		649.895	464.637	
4C	6.7		546.955	739.052	
5A	6.5	6.9	522.431	702.258	711.207
5B	7.0		535.065	791.24	
5C	7.1		532.510	712.124	



Şekil H.1 Kuru ve koşullandırılmış numunelerin film kalınlığı-indirekt çekme gerilmeleri ilişkisi (boşluk oranı %7)

Tablo H.2 Koşullandırılmış numuneler üzerine uygulanan indirekt çekme gerilmesi deneyi sonuçları

Numune No	Hava Boşluğu Yüzdesi	Ortalama Hava Boşluğu Yüzdesi	Doygunluk Derecesi Yüzdesi	Uygulanan Yük (kg)	İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)	Ortalama İndirekt Çekme Gerilmesi (kpa)
1A	7.0	6.9	60.7	935.018	1418.560	1389.938
1B	7.0		72.2	1077.84	1464.010	
1C	6.8		60.2	922.883	1287.240	
2A	7.3	7.1	61.6	839.236	1139.920	1131.126
2B	6.9		61.5	883.420	1187.500	
2C	7.2		58.9	747.797	1065.950	
3A	6.7	6.7	67.1	702.869	985.661	936.109
3B	6.6		65.2	730.126	1068.315	
3C	6.8		59.3	658.114	875.551	
4A	6.7	6.8	65.5	532.577	734.936	747.192
4B	6.9		64.1	604.967	796.691	
4C	6.8		64.0	519.943	709.948	
5A	6.9	6.8	66.4	505.942	656.290	655.094
5B	6.3		69.2	501.577	653.898	
5C	7.2		73	496.204	653.459	