

73404

**ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Müh. Göktolga DÜNDAR

73404

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Eylül 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Kasım 1998

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emine AĞAR

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Güven ÖZTAŞ

Doç. Dr. İlhan SÜTAŞ

[Handwritten signatures of Prof. Dr. Emine AĞAR, Doç. Dr. Güven ÖZTAŞ, and Doç. Dr. İlhan SÜTAŞ]

KASIM 1998

**Y.Ü. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOĞRUKAĞARCIYI KURULU**

ÖNSÖZ

Çalışmanın her aşamasında kıymetli katkılarını ve engin hoşgörüsünü esirgemeyen sayın hocam **Prof. Dr. Emine AĞAR**'a ve çalışmanın değişik aşamalarındaki desteklerinden dolayı Çevre Mühendisleri **Özgür ÖZDEMİR**, **Fatih YILDIZ** ve **İlker SEL**'e teşekkürü bir borç bilirim.

Göktolga DÜNDAR
Haziran, 1998



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	VII
ÖZET	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 AMPİRİK YÖNTEMLER	3
2.1 Giriş	3
2.2 Yol Notu 29 Yöntemi	3
2.2.1 Üstyapı Tipinin Seçimi	4
2.2.2 Tasarım İçin Trafik Tahmini	4
2.2.3 Üstyapının Tasarım Ömrü	12
2.2.4 Esnek Üstyapı Tasarım Verileri	12
2.2.4.1 Zemin	13
2.2.4.2 Drenaj	13
2.2.4.3 Alt Temel	14
2.2.4.4 Temel	16
2.2.4.5 Kaplama Tabakası	16
BÖLÜM 3 ANALİTİK YÖNTEMLER	23
3.1 Giriş	23
3.2 Shell Üstyapı Tasarım Yöntemi	24
3.2.1 Tasarım Ölçütleri	26
3.2.2 Tasarım Verileri	36
3.2.2.1 Trafik	36
3.2.2.2 İklim	37
3.2.2.3 Malzeme Özellikleri	37
3.2.2.3.1 Zemin	37
3.2.2.3.2 Bağlayıcısız Tabakalar	38
3.2.2.3.3 Çimentolu Temeller	38
3.2.2.3.4 Asfalt Kaplama	38
3.2.2.3.5 Poisson Oranı	49

3.2.3	Tasarım Eğrileri	50
3.2.4	Temel Hesaplamalar	50
3.2.5	Tipik Tasarım Kriterleri	51
3.2.6	PC Versiyonu	55
3.2.6.1	İklimin Asfalt Karışımın Sıcaklığına Etkisi	55
3.2.6.2	Üstyapı Tasarım Ömrünün Trafik Yüğü Kullanılarak Belirlenmesi	56
3.2.6.3	Temel Ve Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	56
3.2.6.4	Bitümün Rijitliğinin Belirlenmesi	59
3.2.6.5	Asfalt Karışımın Rijitliğinin Belirlenmesi	59
3.2.6.6	Üstyapı Ömrünün Ve Asfalt Tabakası Kalınlığının Belirlenmesi	59
BÖLÜM 4 ANALİTİK – AMPİRİK YÖNTEMLER		61
4.1	Giriş	61
4.2	AASHTO 93 Yöntemi	61
4.2.1	Esnek Üstyapının Tasarımı İçin Gerekli Veriler	65
4.2.1.1	Genel Tasarım Değişkenleri	66
4.2.1.1.1	Zaman Kısıtları	66
4.2.1.1.2	Trafik	67
4.2.1.1.3	Güvenilirlik	79
4.2.1.1.4	Çevresel Etkiler	80
4.2.1.2	Performans Ölçütü	82
4.2.1.3	Yapısal Tasarım İçin Malzeme Özellikleri	84
4.2.1.3.1	Taban Zemini Elastisite Modülü	84
4.2.1.3.2	Üstyapı Tabakalarının Tabaka Katsayıları ve Elastisite Modülleri	85
4.2.1.4	Üstyapının Yapısal Özellikleri - Drenaj	93
4.2.2	Gerekli Üstyapı Kalınlığının Belirlenmesi	94
BÖLÜM 5	AMPİRİK, ANALİTİK VE ANALİTİK-AMPİRİK YÖNTEMLER KULLANILARAK ESNEK ÜSTYAPILARIN TASARIMI	98
5.1	Yol Notu 29 Ampirik Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı	98
5.1.1	Veriler	98
5.1.2	Çözüm	98
5.2	Shell Üstyapı Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı	99
5.2.1	Veriler	99
5.2.2	Çözüm	99
5.3	AASHTO 93 Analitik-Ampirik Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Kalınlığının Hesabı	107

5.3.1 Veriler	107
5.3.2 Çözüm	109
BÖLÜM 6 SONUÇLAR	112
KAYNAKLAR	114



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %3	6
Şekil 2.2 Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %4	7
Şekil 2.3 Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %5	8
Şekil 2.4 Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %6	9
Şekil 2.5 Yerleşim bölgeleri ve civarındaki yollar: Her bir yavaş şeritten geçen toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı	11
Şekil 2.6 Alt temel kalınlığı	15
Şekil 2.7 Yoğun Makadam Temel: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar	17
Şekil 2.8 Rolled Asfalt Temel: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar	18
Şekil 2.9 Zayıf Beton, Çimentolu Zemin ve Çimento Bağlayıcılı Granüler Temeller: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar	19
Şekil 2.10 Islak Karışım ve Kuru Bağlayıcılı Makadam Temeller: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar	20
Şekil 3.1 Esnek üstyapının basitleştirilmiş şekli	25
Şekil 3.2 Deformasyon tekrarlarının bir fonksiyonu olarak izin verilebilir taban zemini deformasyonu	29
Şekil 3.3 S_{mix} ve V_b 'ye bağlı yorulma nomografı	30
Şekil 3.4 Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak izin verilebilir taban zemini deformasyonu (Yoğun bitümlü makadam)	33
Şekil 3.5 Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak izin verilebilir taban zemini deformasyonu (Zayıf bitümlü makadam)	33
Şekil 3.6 Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için izin verilebilir taban zemini deformasyonu (parantez içindeki sayılar Tablo 3.1'deki karışımları gösterir)	34
Şekil 3.7 Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak temsili karışımlar için izin verilebilir taban zemini deformasyonu (parantez içindeki sayılar Tablo 3.1'deki karışımları gösterir)	35
Şekil 3.8 Bitümün rijitliğini belirlemede kullanılan Van der Poel nomografı	40
Şekil 3.9 Bitümlü karışımların rijitliğini bulmak için kullanılan nomograf	41
Şekil 3.10 Bitümün rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak farklı asfalt karışımların rijitlik modülleri	43
Şekil 3.11 Bitümün rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımların rijitlik modülleri	44

Şekil 3.12	Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımların rijitlik modülleri (80/100 pen bitümlü karışımlar), Karışım numaraları Tablo 3.1'dekileri gösterir	45
Şekil 3.13	Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımların rijitlik modülleri (40/60 pen bitümlü karışımlar), Karışım numaraları Tablo 3.1'dekileri gösterir	45
Şekil 3.14	MMAT ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak asfalt karışımın rijitlik modülü (80/100 pen bitümlü Yoğun Bitümlü Makadam)	47
Şekil 3.15	MMAT ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak efektif asfalt sıcaklığı	47
Şekil 3.16	Ağırlıklı sıcaklık bulma eğrisi	48
Şekil 3.17	Tipik tasarım eğrileri (Değişken N)	52
Şekil 3.18	Tipik tasarım eğrileri (Değişken ağırlıklı yıllık ortalama hava sıcaklığı, MAAT)	52
Şekil 3.19	Farklı karışım tipleri için tipik tasarım eğrileri	53
Şekil 3.20	Çimentolu temel tabakasına sahip üstyapıların kalınlık tasarımı	54
Şekil 3.21	Taban zemininin veya bağlayıcısız temel malzemelerinin dinamik modülünün belirlenmesi	58
Şekil 4.1	Belli bir bölge için zamana bağlı olarak toplam çevresel servis yeteneği kaybı	83
Şekil 4.2	Asfalt betonunun tabaka katsayısının (a_1) resilient modüle bağlı olarak bulunması	87
Şekil 4.3	Granüler temelin tabaka katsayısının (a_2) farklı gerilme değerlerine bağlı olarak bulunması	88
Şekil 4.4	Granüler alt temel tabakasının tabaka katsayısının (a_3) bulunması	90
Şekil 4.5	Çimentolu temel tabakasının tabaka katsayısının (a_2) bulunması	91
Şekil 4.6	Bitümlü temel tabakasının tabaka katsayısının (a_2) bulunması	92
Şekil 4.7	Esnek üstyapılar için tasarım çizelgesi	95
Şekil 4.8	Tabaka analiziyle tabaka kalınlıklarının belirlenmesi	97
Şekil 5.1	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	103
Şekil 5.2	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	103
Şekil 5.3	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	104
Şekil 5.4	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	104
Şekil 5.5	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	105
Şekil 5.6	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	105
Şekil 5.7	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	106
Şekil 5.8	Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması	106

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Daha doğru bir değerlendirmenin mümkün olmadığı hallerde yerleşim bölgeleri ve civarlarındaki yolların projelendirilmesinde kullanılmak üzere her bir yön için tavsiye edilen ticari trafik akımı	10
Tablo 2.2	Ticari taşıt sayısından eşdeğer standart dingil sayısını elde etmek için kullanılan dönüştürme sayıları	12
Tablo 2.3	Doğal su muhtevasında sıkıştırılmış zeminler için kabul edilen laboratuvar CBR değerleri, (İngiltere'deki zeminler için)	13
Tablo 2.4	Yeni yapılacak üstyapılarda kullanılabilecek bitümlü kaplamalar	21
Tablo 3.1	Asfalt karışımlarının kompozisyonu	32
Tablo 3.2	Çeşitli bölgeler için sıcaklık verileri	49
Tablo 3.3	Tipik kaplama yapıları	49
Tablo 4.1	Tavsiye edilen analiz periyodları	67
Tablo 4.2	Taşıt eşdeğerlik faktörleri	68
Tablo 4.3	Şerit sayısına göre tavsiye edilen şerit dağıtma faktörleri	69
Tablo 4.4	Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_t = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	70
Tablo 4.5	Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	71
Tablo 4.6	Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	72
Tablo 4.7	Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	73
Tablo 4.8	Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	74
Tablo 4.9	Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	75
Tablo 4.10	Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	76
Tablo 4.11	Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	77

Tablo 4.12	Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri	78
Tablo 4.13	Yol sınıfları için önerilen Güvenirlik seviyesi oranları	80
Tablo 4.14	Güvenirlik oranlarına bağlı olarak verilen standart sapma değerleri	80
Tablo 4.15	Esnek üstyapılar için önerilen başlangıç ve son servis yeteneği indisleri	82
Tablo 4.16	Temel ve alt temel malzemeleri için tipik k_1 ve k_2 değerleri	86
Tablo 4.17	Gerilme Durumu - Elastisite Modülü ilişkisi	86
Tablo 4.18	Temel tabakası için taban zemini elastisite modülü (M_R) ile asfalt betonu kalınlığı değerlerine bağlı olarak kullanılması gereken “ θ ” değerleri	87
Tablo 4.19	Alt temel için “ θ ” değerleri	89
Tablo 4.20	Gerilme Durumu “ θ ” - Elastisite Modülü “ E_{SB} ” ilişkisi	89
Tablo 4.21	Üstyapı tasarımı için drenaj kalitesi düzeyleri	93
Tablo 4.22	Esnek üstyapılarda tasfiye edilmemiş temel ve alt temel malzemeleri için önerilen “ m ” değerleri	93
Tablo 4.23	Uygulamada kullanılabilecek minimum asfalt kaplama ve temel kalınlıkları	96
Tablo 5.1	Shell analitik tasarım yöntemiyle esnek üstyapı tasarımı	102

ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Esnek yol üstyapısı, Tasarım ömrü, Analitik tasarım yöntemi, Ampirik tasarım yöntemi, SPDM, AASHTO 93, Servis yeteneği, CBR (California Taşıma Oranı).

Bu çalışmada esnek yol üstyapılarının tasarımında kullanılan yöntemler ele alınmış ve bu yöntemlerin en çok bilinenleri incelenmiştir.

Bir yol üstyapısının projelendirilmesinde amaç; proje süresi boyunca yolun maruz kalacağı trafiği güvenli bir şekilde yani büyük deformasyonlar ve çatlamlar oluşmaksızın taşıyabilecek üstyapı kalınlığının ve üstyapının yapımında kullanılacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir.

Tüm dünyada esnek yol üstyapılarının projelendirilmesinde çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler genel olarak “Ampirik, Analitik ve Analitik-Ampirik Tasarım Yöntemleri” olarak üç ana başlık altında toplanabilir.

Ampirik Yöntemler : Halihazırda dünya üzerinde uygulanan tasarım yöntemlerinin çoğu uygulamalardan ve özel olarak inşa edilmiş test yollarından elde edilen bilgilere dayandırılan, ayrıca teorik bilgilerle de desteklenen ampirik yöntemlerdir. Bu yöntemler üstyapı kalınlığı ile zeminin dayanıklılığı, önerilen malzemeler ve üstyapının ömrü boyunca maruz kalması beklenen trafik yükü arasında bağlantı kurar.

Analitik Yöntemler : Analitik yaklaşımda teorik analiz ile bitümlü malzemelerin özellikleri kullanılır ve prensip olarak her türlü tasarım durumuna uygun sonuçlar alınabilir. Analitik tasarım yönteminde üstyapı diğer inşaat mühendisliği yapıları gibi düşünülür. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, tahmini trafik yükü ve çevresel koşullar dikkate alınarak bilgisayar programları ve abaklar yardımıyla tabaka kalınlıkları bulunur.

Son yıllarda yapılan araştırmalarla analitik tasarım yöntemlerinde önemli gelişmeler olmuş ve bu konuda çok çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiş, ilk önceleri yalnızca büyük şirketlerin kullandığı bu programlar kişisel bilgisayarlar yaygınlaştıkça mühendisler tarafından da kullanılmaya başlanmıştır.

Analitik-Ampirik Yöntemler : Yapılan araştırmalar sonucunda üstyapının performansında analitik yöntemle modellenemeyen bazı faktörlerin etkili olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak analitik yöntemlerin ampirik bağıntılarla ve performans gözlemleriyle kalibrasyonunun gerekliliği hissedilmiş, sonuçta analitik-ampirik yöntemler geliştirilmiştir.

AASHO 1972 rehberinde analitik yöntem kullanılmamıştır. AASHTO 1986 rehberinde ise söz konusu yöntemden dolayı olarak yararlanılmış (yük nakli ve drenaj katsayısı, resilient modül). bu sayede malzemeler yarı elastik modülle temsil edilebilmiştir.

SUMMARY

COMPARISON OF FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN METHODS

KEYWORDS: Flexible pavement, design life, analytical design method, empirical design method, SPDM, Road Note 29, AASHTO 93, serviceability, CBR (California Bearing Ratio).

In this paper flexible pavement design methods are discussed and the most popular ones are presented.

The aim of pavement design is to select the most economic pavement thickness and composition which will provide a satisfactory level of service for the anticipated traffic without any permanent deformation and cracking.

Before designing a pavement structure the answers of the questions below should be given:

- What is the expected traffic volume per year or per day?
- What is the expected design life?
- What are the failure criteria?

There are various design methods that are being used in flexible pavement design all around the world. This methods, however, can be classified in general as “Analytical, Empirical and Semi-empirical Design Methods”.

In analytical approach theoretical analysis and properties of bituminous materials are used, and in principle design process can be made under any condition. The philosophy of the analytical method is that the structure should be treated in the same way as other civil engineering structures, the procedure for which may be summarised as follows:

1. Specify loading.
2. Estimate proportions.
3. Consider the materials available.
4. Carry out a structural analysis using theoretical principles.
5. Compare critical stresses, strains or deflections with allowable values.
6. Make adjustments to materials or geometry until a satisfactory design is achieved.
7. Consider the economic feasibility of the result.

Analytical pavement design is not a new idea. Westergaard developed a method for determining stresses in rigid pavements in 1926. In the late fifties interest in analytically based design procedures grew and in 1963 Shell published a set of design charts which were derived from structural analysis of a range of options. This was superseded in 1978 by the Shell Pavement Design Manual (SPDM) which was updated in 1985. Although based on computer models of pavement structures, these two documents also present the design method in the form of graphs, charts and tables so that it is accessible to engineers in the field who don't have access to sophisticated computing aids.

SPDM considers the pavement structure as a multilayered system consisting of a bituminous pavement on a base of unbound granular material overlying the existing subgrade as shown in *Figure 1*.

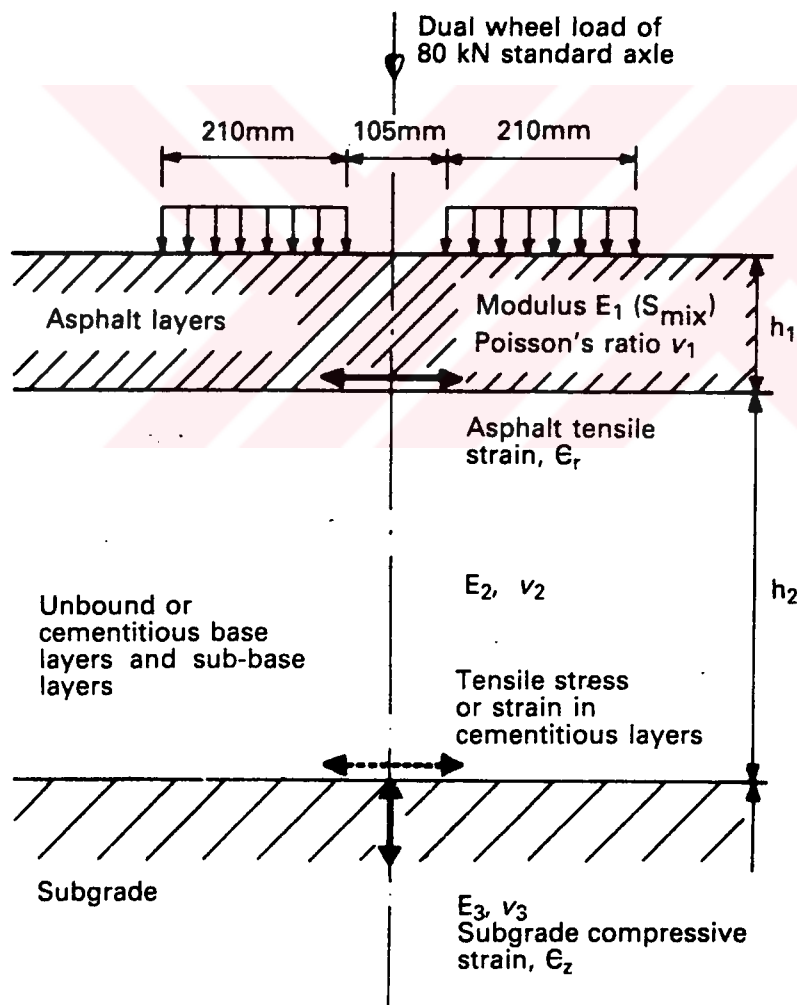


Figure 1. Three-layer pavement model

In SPDM using the BISAR (**BI**tumen **S**tress **A**nalysis in **R**oads) program, those points in the pavement structure where the stresses and strains generally have their maximum value have been determined for the wide range of moduli and layer thicknesses.

The primary criteria have been found to be:

- The compressive strain at the surface of the subgrade (ϵ_z); this controls the permanent deformation of the subgrade.
- The horizontal tensile strain in the asphalt layer, generally at the bottom (ϵ_r); this controls cracking of the asphalt layer.

In addition Shell researchers introduced a subgrade strain criterion in 1974 using the BISTRO (**BI**tumen **S**Ttructures in **RO**ads) program for different confidence levels:

$$\epsilon_z = 2.8 * 10^{-2} * N^{-0.25} \quad (50\% \text{ confidence}) \quad (1)$$

$$\epsilon_z = 2.1 * 10^{-2} * N^{-0.25} \quad (85\% \text{ confidence}) \quad (2)$$

$$\epsilon_z = 1.8 * 10^{-2} * N^{-0.25} \quad (95\% \text{ confidence}) \quad (3)$$

where ϵ_z : Vertical strain at the top of subgrade
and N : Number of load applications.

On the basis of laboratory data obtained from constant strain fatigue tests, the SPDM presented a nomograph relating the induced asphalt strain to the number of load applications for a given mix formulation:

$$\epsilon_r = (0.856 * V_{bit} + 1.8) * S_{mix}^{-0.36} * N_{fat}^{-0.2} \quad (4)$$

where ϵ_r : Horizontal strain in the asphalt
 N_{fat} : Number of applications of the strain ϵ_r to failure
 V_{bit} : The volume of binder in the mix (%)
 S_{mix} : The mix stiffness under the design conditions (N / m^2)

Recently the most of design methods that are being used around the world are empirical methods which are based on the data obtained from the test roads and are theoretical information. These methods deal with the strength of subgrade, suggested materials and with the expected traffic. One of the most popular empirical design method is Road Note 29.

Road Note 29 was published originally in 1960, and the first major revision was issued in 1965. This note deals solely with the construction of new roads and not with the resurfacing and maintenance of existing roads.

To render the document more versatile, traffic is defined in terms of the cumulative equivalent number of 8200 kg (18-kip) axles (to be called standard axles) to be carried during the design life of the road. From the initial traffic intensity and estimated traffic growth rate, the engineer can prepare designs suitable for any life

up to 40 years. The accuracy of designs will depend very largely on the accuracy of the traffic prediction over the chosen life.

In the Note it is recommended that a flexible pavement should normally be designed for a life of 20 years. However for roads in residential and associated developments, the use beyond 20 years, can be regarded as a certain.

Road Note 29 consists several tables and graphs which allow engineer to design every layer of a flexible pavement for any traffic intensity, material, drainage condition, and subgrade type.

As a result of researchs it has been understood that there are some factors in pavements performance that can not be explained with analytical approach. Thus semi-empirical methods have been introduced. In these methods analytical methods are supported with empirical relations and performance observations. AASHTO 93 is the newest one of these methods.

The AASHTO 93 flexible pavement design model is an extension of the original pavement performance model developed from the results of the 2-year AASHO Road Test conducted near Ottawa, Illinois, from 1958 to 1960.

The original empirical regression model related the Present Serviceability Index to slab thickness and axle load magnitude, type, and repetitions. This model was modified and extended by considering drainage, effective roadbed soil resilient modulus, layer coefficients based on the resilient modulus, and incorporation of design reliability.

In this approach the required data for design of pavement is as follows:

1. Performance Criteria - Serviceability
2. Design Variables
 - a) Time Constraints
 - i) Performance Period
 - ii) Analysis Period
 - b) Traffic
 - c) Reliability
 - d) Environmental Impacts
 - i) Roadbed Swelling
 - ii) Frost Heave
3. Material Properties
 - a) Effective Roadbed Soil Resilient Modulus
 - b) Pavement Layer Materials Characterization
 - c) Layer Coefficients
4. Pavement Structural Characteristics
 - a) Drainage

The final AASHTO 93 structural design model is the same as that was used in AASHTO 86, and is shown in equation 5.

$$\log(W_{8.2}) = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log(M_R) - 8.07 \quad (5)$$

where

- W_{18} : Predicted number of 80kN (18-kip) single axle load applications
- Z_r : Standard normal deviate corresponding to selected level of reliability
- S_0 : Overall standard deviation
- SN : Structural number
- ΔPSI : Design serviceability loss
- M_R : Roadbed soil resilient modulus, psi

In addition to this:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (6)$$

where

- a_i : Layer coefficient of layer i.
- D_i : Thickness of layer i, in.
- m_i : Drainage modifying factor for layer i.

Recommended reliability levels for various types of roads, recommended m_i values are given in the tables below:

Table 1 Guidelines for design reliability (AASHTO 93)

Functional Classification	Urban	Rural
Interstate and other freeways	85 - 99.9	80 - 99.9
Principal arterials	80 - 99	75 - 95
Collectors	80 - 95	75 - 95
Locals	50 - 80	50 - 80

Table 2 Recommended m_i values for modifying structural layer coefficients of untreated base and subbase materials in flexible pavements (AASHTO 93)

Quality of Drainage	Percent Of Time Pavement Structure Is Exposed To Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less than 1%	%1-5	%5-25	Greater than 25%
Excellent	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Good	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Fair	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Poor	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Very Poor	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

There are also some other formulas, tables, and graphs in AASHTO 93 for calculating layer coefficients, structural number, anticipated traffic, roadbed soil resilient modulus, resilient modulus of layers, and etc.

A designer can easily design a flexible pavement structure by using those tables, formulas and graphs.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üstyapı Tasarım Esasları

Bir yol üstyapısının tasarımında güdülen esas amaç, tasarım süresi boyunca, yolun maruz kalacağı trafik yükünü güvenli bir şekilde yani büyük deformasyonlar ve çatlamlar oluşmaksızın taşıyabilecek üstyapının toplam kalınlığının ve üstyapıyı meydana getiren tabakaların her birinin kalınlıklarının belirtilmesi, üstyapının yapımında kullanılacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir.

Yollar diğer mühendislik yapılarından farklı olarak sonsuz uzunluktadır. Dolayısıyla yol üstyapısının oturduğu taban zemini yer yer değişik davranışlar gösterebilir. Bütün bunlara ek olarak üstyapıyı oluşturan tabakaların da farklı özellikler taşıdığı göz önüne alınırsa ortaya tasarlanması gereken karışık bir sistem ortaya çıkmaktadır (AĞAR, UMAR 1990).

Genellikle bir mühendislik yapısını tasarlamak için aşağıdaki konuların bilinmesi gerekir:

1. Yapının neye hizmet etmesini istiyoruz?
2. Bu hizmeti ne kadar süre için yapmasını istiyoruz?
3. Hizmet ömrü bittiğinde ne durumda olmasını bekliyoruz?

Yolların ve özellikle üstyapının tasarlanması söz konusu olduğunda ise şu soruların cevapları açıkça bilinmelidir :

1. Yol bir günde veya bir yılda ne miktarda ve ne tipte trafik taşıyacaktır?

2. Yolun hizmet etmesi istenen süre (hizmet ömrü) nedir?
3. Yol hangi ölçütlere göre bozulmuş kabul edilecektir?

Tüm dünyada, esnek yol üstyapılarının tasarımında çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Burada bu yöntemler genel olarak “Analitik, Ampirik ve Analitik-Ampirik Tasarım Yöntemleri” olarak üç başlık altında ele alınacak ve irdelenip karşılaştırılacaktır.



BÖLÜM 2

AMPİRİK YÖNTEMLER

2.1 GİRİŞ

Günümüzde dünya üzerinde uygulanan tasarım yöntemlerinin çoğu uygulamalardan ve özel olarak inşa edilmiş test yollarından elde edilen bilgilere dayandırılan ayrıca teorik bilgilerle de desteklenen ampirik yöntemlerdir. Bu yöntemler kaplama kalınlığı ile zeminin dayanıklılığı, önerilen malzemeler ve kaplamanın ömrü boyunca maruz kalması beklenen trafik yükü arasında bağlantı kurar (AĞAR 1996).

Ampirik tasarım yöntemleri mühendislik ilkelerinden uzaklaşmıştır, deneyin yapıldığı koşullarla sınırlıdır ve kendisine temel oluşturan test yolunun sahip olduğu şartlardan başkasıyla baş edemez. Bununla birlikte yollarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin ve yapısal davranışlarının karışık oluşu ampirik yöntemlerin uzun yıllar kullanılmasına yol açmıştır.

2.2 YOL NOTU 29* YÖNTEMİ

Yol Notu 29 ilk olarak 1960 yılında orta ve ağır trafik taşıyan yolların tasarlanmasında bir rehber olması amacıyla yayınlandı. 1965 yılında yapılan düzeltmelerle rehberin yerleşim alanlarındaki hafif trafiğe maruz kalan yolların tasarlanmasında da kullanılabilir hale gelmesi sağlandı. Bunun dışında ilk baskıya göre yalnızca bazı ufak tefek değişiklikler yapıldı.

Yol Notu 29'daki düzeltmeleri Tasarım ve İnşaat Laboratuvarı Komisyonu'ndan bir heyet yaptı. Heyetin başlıca amacı trafiğin tahrip gücünü göz önünde bulundurarak,

*Bu bölümde yer alan tablo ve grafikler RRL, Road Note 29 adlı kaynaktan alınmıştır.

etkilerini daha gerçekçi bir şekilde ifade etmek ve tasarım işlemini birçok ülkenin anayollarındaki çok ağır trafik şartlarına cevap verecek şekle getirmekti.

Düzeltilip yenilenmiş yöntemle mühendislere tasarım ömrünü seçme serbestisi getirilmiş ve tasarımda yapmayı düşüneceği herhangi bir değişikliğin üstyapı ömrü üzerindeki muhtemel etkilerini tahmin edebilme imkanı sağlanmıştır.

İlk baskılarda tasarımlar yolun inşaattan sonraki 20 yıl boyunca taşıyacağı günlük ticari taşıt sayısını hesaba katıyordu ve ticari trafiğin yıllık artış oranı %4 olarak öngörülmüştür (R.R.L.,1970).

Rehberi daha basit ve kullanışlı hale getirmek için trafik yükü yolun tasarım ömrü süresince taşıyacağı 8.2 tonluk (18 kip) eşdeğer standart dingil sayısı ile ifade edilmektedir. Bu yaklaşım kullanılmak suretiyle yerleşim merkezlerindeki yollardan otoyollara kadar her türlü yol için 40 yıllık bir tasarım ömrüne kadar tasarım yapılabilir.

Bu yaklaşım endüstriyel amaçlı veya özel trafik taşıyan yollarda da kullanılabilir. Tasarımların doğruluğu, büyük oranda, trafik yükünün doğru tahmin edilebilmesine bağlıdır (R.R.L.,1970)

2.2.1 Üstyapı Tipinin Seçimi

Yol Notu 29 Tasarım Rehberi her türlü zemin ve trafik şartlarında uygun tasarım yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Bu sebeple seçilecek üstyapı tipi (rijit veya esnek) daha çok ekonomik kabullere bağlıdır (R.R.L., 1970).

2.2.2 Tasarım İçin Trafik Tahmini

Özel araçların uyguladığı yüklemeler üstyapıda belirgin bir hasara yol açmadığı için tasarıma esas olarak yalnızca ticari araçlar ve onların dingil yükleri alınmakta, yapılacak hesaplamalarda bunlar kullanılmaktadır (Ticari araç : Yük veya insan taşıyan, boş ağırlığı 1500 kg'dan fazla olan araçlar).

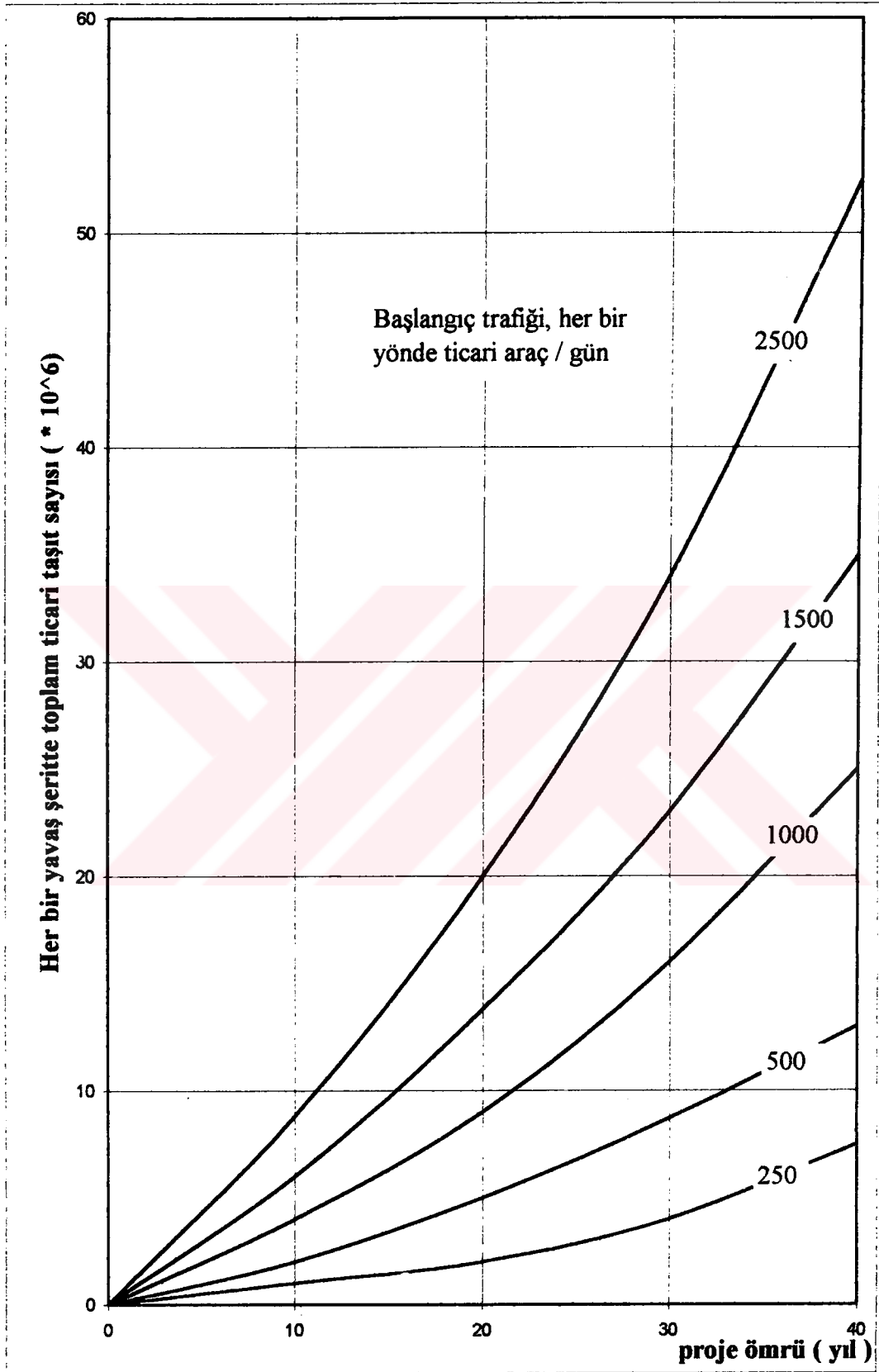
Yol Notu iki şeritli yollarda her iki şerit için de kullanılabilir. Her yön için üç şerite kadar kapasitesi olan bölünmüş yollarda veya ikiden fazla şeritli, tek yönlü yollarda yavaş trafik şeritleri için tasarım yapılabilir (R.R.L.,1970).

Sayım verilerinden elde edilen trafik bilgileri inşaat sırasındaki ticari araç miktarının ve yıllık artış oranının tahminine imkan verir. Artış oranının tahmin edilemediği durumlarda ortalama olarak %4 değerinin alınması uygundur. Bu yöntemde trafik yoğunlukları, aksi belirtilmedikçe, her bir yön için günlük ticari araç miktarı şeklinde verilmiştir.

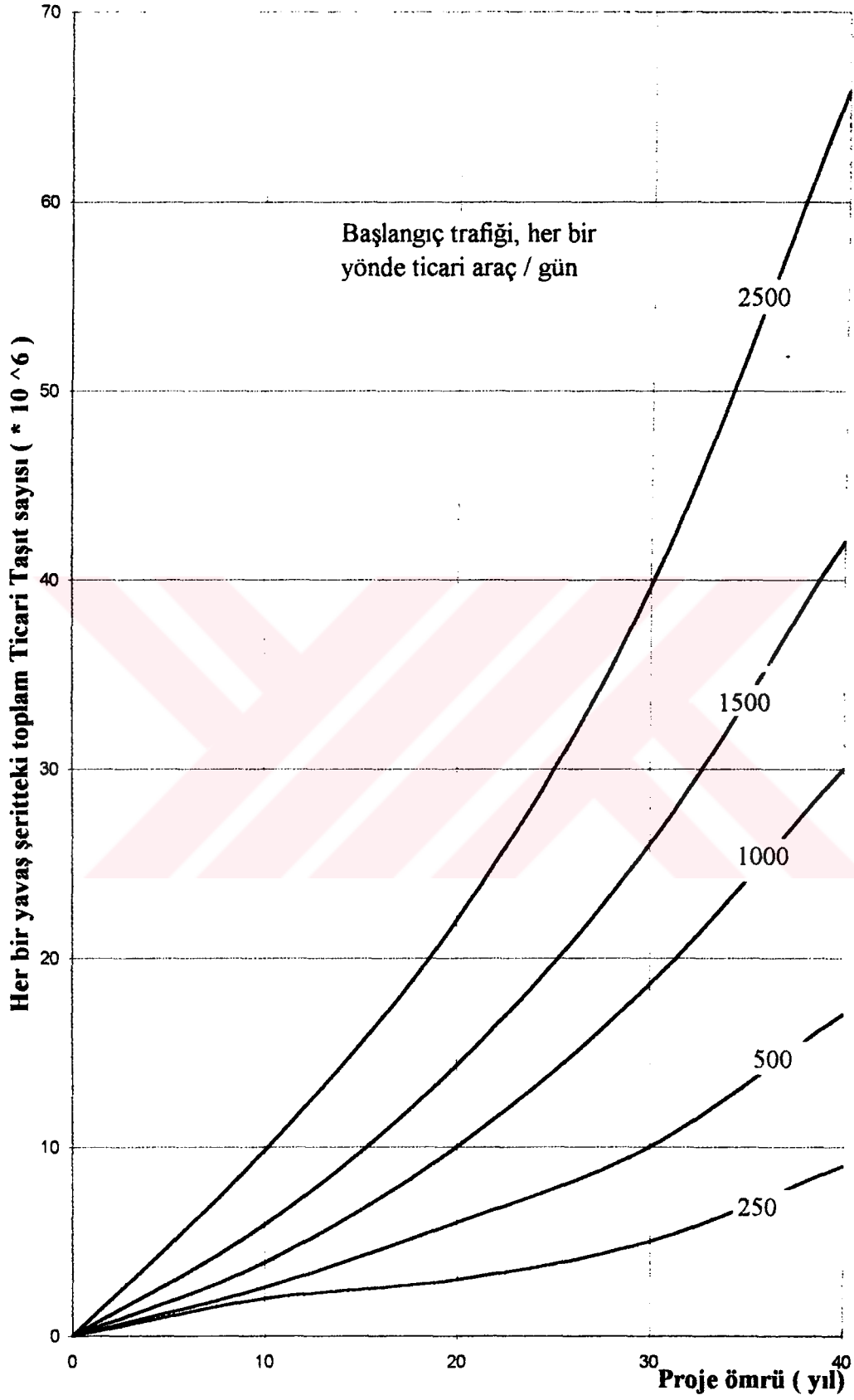
Başlangıçtaki çeşitli araç trafiği değerleri ve %3'lük bir artış oranı için 40 yıla kadar olan tasarım ömürleri için yavaş şeritte taşınacak olan toplam eklenik ticari araç sayısı *Şekil 2.1*'de verilmiştir.

Eğriler çizilirken trafik yoğunluğu arttıkça yavaş şeritten komşu şeritlere doğru yaşanacak ticari araç trafiği aktarımı da hesaba katılmıştır. *Şekil 2.2*, *Şekil 2.3* ve *Şekil 2.4* 'te sırasıyla %4, %5 ve %6'lık artış oranları için benzer grafikler verilmiştir.

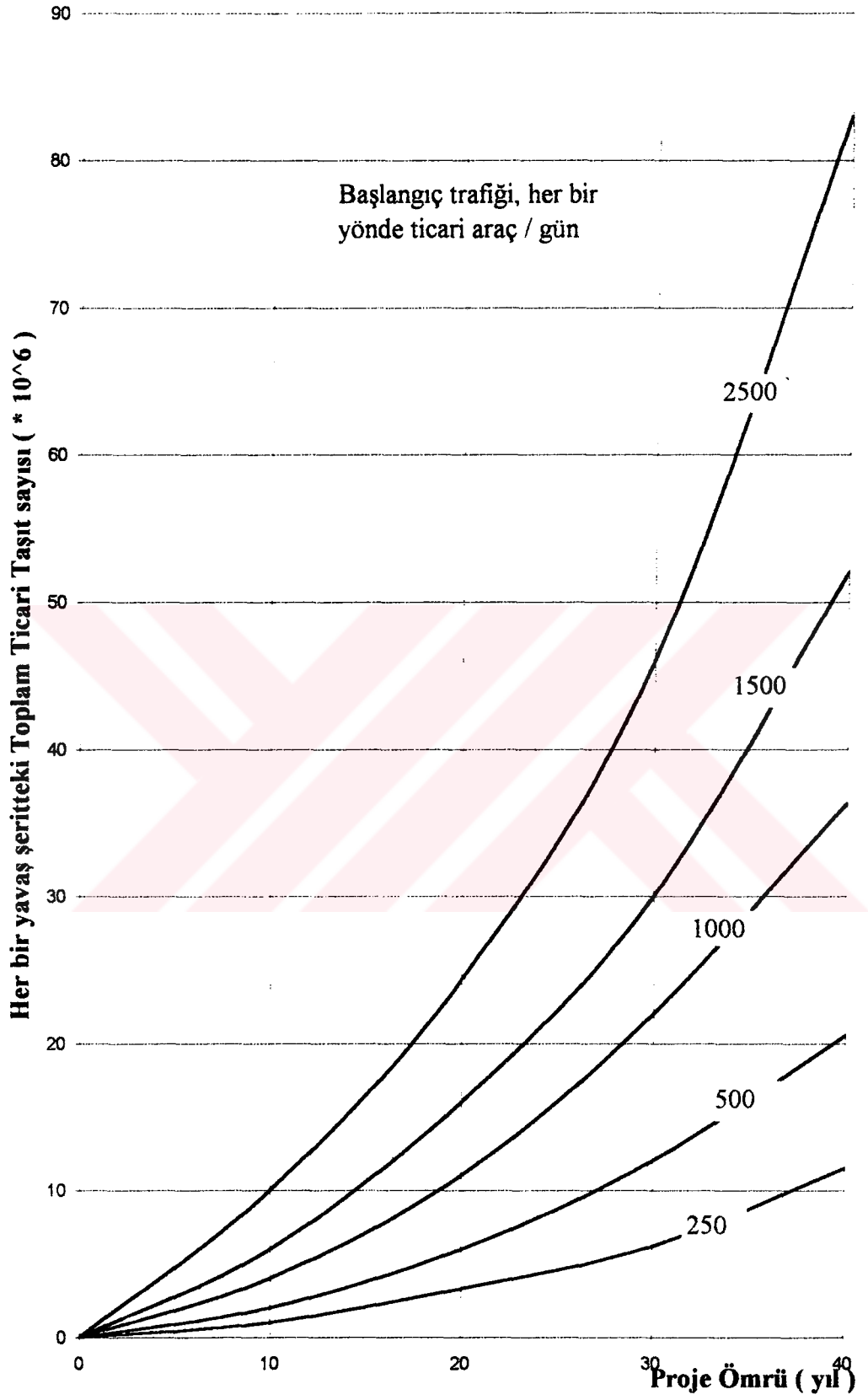
Ender olmakla birlikte bazı durumlarda her bir yön için 2500 ticari araçtan daha fazla bir başlangıç trafiği için tasarım yapmak gerekebilir (*Şekil2.1 - 2.4*). Bu tip yolların başlangıçtaki yıllık trafik artış oranı da ülke ortalamasının üzerinde olabilir, böyle durumlarda yavaş şeritte taşınacak eklenik ticari araç sayısı verilen eğrilerden ekstrapolasyon yapılarak bulunur. Bununla birlikte 20 yıldan uzun ömürlü tasarımlar için çok yüksek değerler (*Şekil2.1 - 2.4*'te 90 milyonu aşan değerler görülmektedir) çıkabilir. Mevcut trafik verilerine göre her bir yavaş şeritte taşınacak toplam eklenik ticari araç yükünün 90 milyonu aşması halinde 90 milyon araca göre tasarım yapılır (R.R.L.,1970).



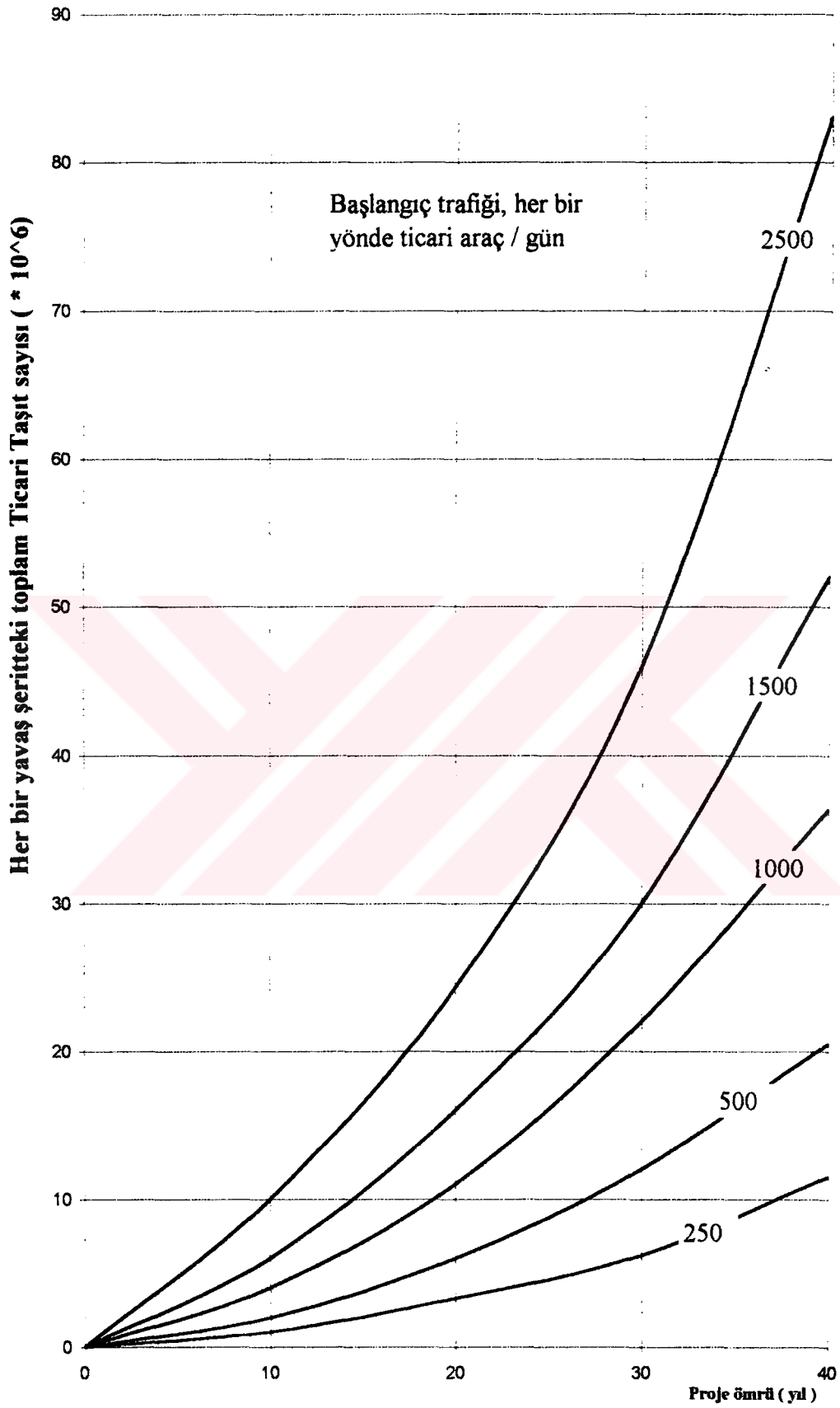
Şekil 2.1. Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı
Artış oranı %3



Şekil 2.2. Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %4



Şekil 2.3. Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı %5



Şekil 2.4. Her bir yavaş şeritteki toplam Ticari Taşıt ile Proje ömrü arasındaki bağıntı, Artış oranı % 6

Genelde yerleşim merkezlerindeki yollar için trafik sayım verileri mevcut değildir. *Tablo 2.1*'de çeşitli sınıflardaki yollar için, daha doğru değerlendirmelerin yapılamadığı durumlarda, tasarımda kullanılacak başlangıçtaki trafik yoğunluğu verilmiştir. *Şekil 2.5*'te bu değerlerin ışığında ve %4'lük artış oranı için yavaş şeritlerin tasarımında kullanılacak toplam eklenik ticari araç sayısının bulunabileceği grafik verilmiştir.

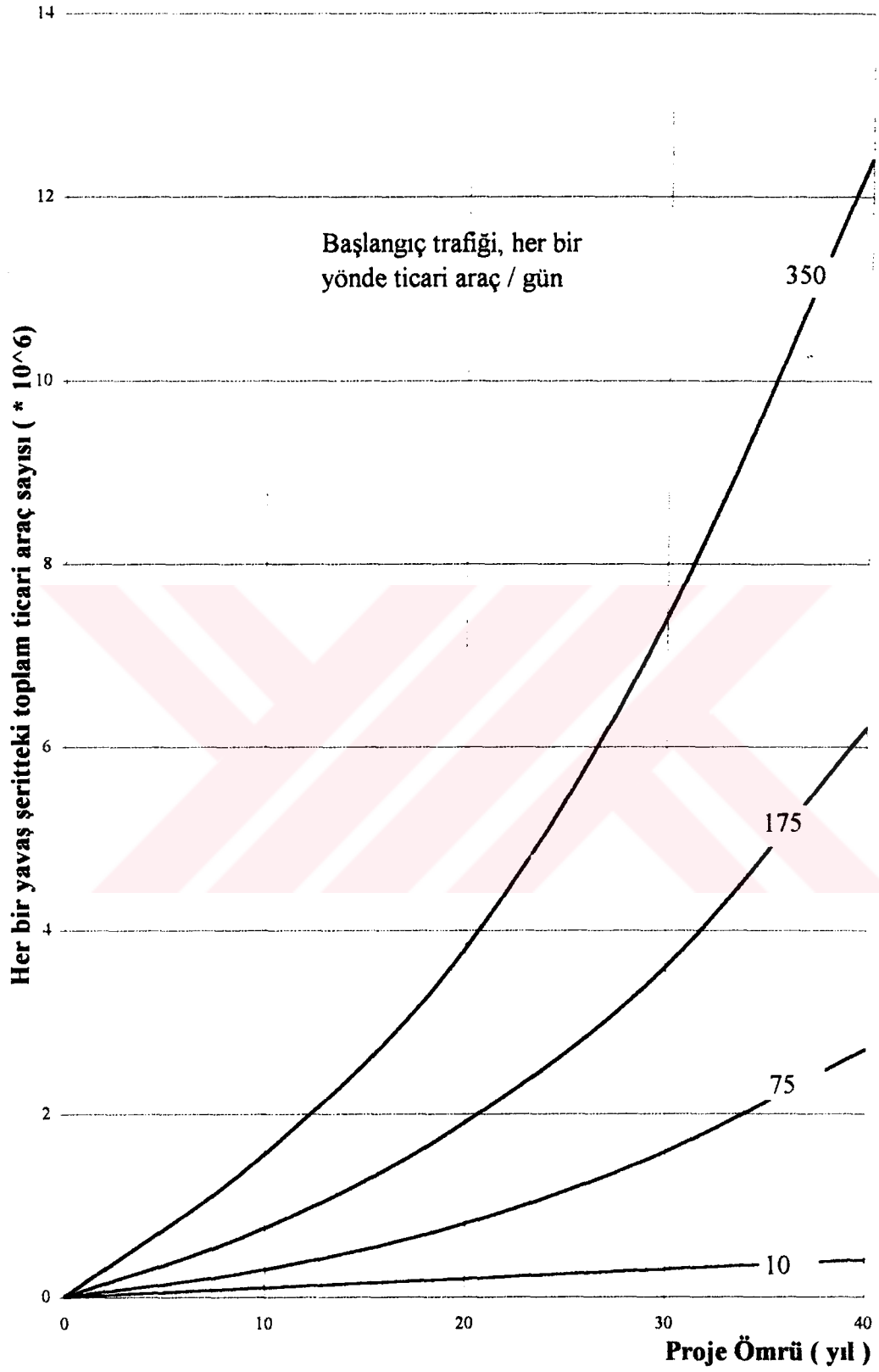
Tablo 2.1 Daha doğru bir değerlendirmenin mümkün olmadığı hallerde yerleşim bölgeleri ve civarlarındaki yolların tasarımında kullanılmak üzere her bir yön için tavsiye edilen ticari trafik akımı

Yol Tipi	Yol yapım başlangıcında tahmini günlük ticari araç sayısı
Çıkamaz sokak ve yan yollar	10
Günde 25 kadar servis seferi yapılan otobüs yolları, Ara yollar	75
Büyük yollar, günde 25 - 50 servis seferi yapılan otobüs yolları	175
Günde 50'den fazla servis seferi yapılan otobüs ana yolları, Ana alış veriş merkezi yolları	350

Ticari taşıtların ortalama dingil sayısı yolun tipine göre değişir. Bu değer otoyollar ve anayollar için 2.7, günlük 250 - 1000 araç taşımaya yönelik tasarlanan yollar için 2.4 ve yerleşim merkezlerindeki yollar için 2.25 olarak alınabilir (*Tablo 2.2*). Bu katsayı kullanılmak suretiyle bir yolun yavaş şeritinin tasarım ömrü boyunca taşıdığı eklenik ticari araç sayısı dingil sayısına dönüştürülebilir (R.R.L.,1970).

AASHO Yol Testi'nden elde edilen verilere göre bir ticari dingilin eşdeğeri 8.2 ton veya 18 kip'tir. Bu değer standart dingil yükü olarak anılır.

Tablo 2.2'de üç tür yol için bir ticari dingile düşen standart dingil sayısı ve tasarımda kullanılacak eklenik standart dingil sayısını bulmak için her bir yavaş şeritteki eklenik ticari araç sayısının çarpılacağı değer verilmiştir.



Şekil 2.5. Yerleşim bölgeleri ve civarındaki yollar: Her bir yavaş şeritten geçen toplam Ticari Taşıt ile Proje Ömrü arasındaki bağıntı

Tablo 2.2 Ticari taşıt sayısından eşdeğer standart dingil sayısını elde etmek için kullanılan dönüştürme sayıları

Yol Tipi	Her bir ticari araçtaki dingil sayısı	Her bir ticari dingile eşdeğer standart dingil sayısı	Her bir ticari araca eşdeğer standart dingil sayısı
Otoyollar, yapım başlangıcında HER BİR YÖNDE günde 1,000'den fazla ticari araç geçecek şekilde tasarlanmış ana yollar	2.7	0.4	1.08
Yapım başlangıcında HER BİR YÖNDE günde 250 - 1,000 ticari araç geçecek şekilde tasarlanmış yollar	2.4	0.3	0.72
Diğer bütün genel yollar	2.25	0.2	0.45

2.2.3 Üstyapının Tasarım Ömrü

Tasarım mühendisinin öncelikle üstyapının hizmet vermesini istediği süreye karar vermesi gerekir. Seçilen ömür yolun tipinden, tasarım ömrü sonunda hangi amaçla kullanılacağından ve yolun esnek veya rijit olmasından etkilenir (R.R.L.,1970).

Yol Notu 29'da esnek üstyapıların kısa süreler için tasarımı yapılmakta, arada gerekli tamirat ve bakımların yapılması suretiyle sürüş kalitesi ve ömrün artırılması yoluna gidilmektedir. Esnek üstyapılar için normal şartlarda 20 yıllık bir tasarım ömrü önerilmektedir.

2.2.4 Esnek Üstyapı Tasarım Verileri

Tasarım hazırlanırken trafik, tasarım ömrü, zemin, alt temel, yol temeli ve kaplama sırasıyla ele alınır. Başlangıçtaki ticari trafik, artış oranı ve tasarım ömrü, her bir yavaş şeritin taşıyacağı eklenik standart dingil yükü miktarı belirlenirken "Tasarım İçin Trafik Tahmini" bölümünde anlatılan yöntem kullanılır. Üstyapının çeşitli tabakaları için önerilen minimum kalınlıklar Şekil 2.6 - 2.10'dan alınır ve tabaka kalınlıkları hesaplanırken sonuçlar bir üst 10 mm'ye tamamlanır.

2.2.4.1 Zemin

Yarma veya dolgu her türlü zemin ilgili şartnamelere göre sıkıştırılıp şekillendirilir. Üstyapı kalınlığının belirlenmesinde zeminin sağlamlığı başlıca faktör olmakla birlikte don etkisinden kaynaklanan bozulmalar da hesaba katılması gereken bir diğer konudur. Zeminin sağlamlığı CBR ölçeğine göre değerlendirilir (R.R.L.,1970).

Tablo 2.3'te zemin türü ve CBR değeri arasındaki ilişki verilmiştir. Bu bilgiler birçok alanda uygun CBR değerinin elde edilmesi için yeterlidir.

Tablo 2.3 Doğal su muhtevasında sıkıştırılmış zeminler için kabul edilen laboratuvar CBR değerleri, (İngiltere'deki zeminler için)

Zemin Cinsi	Plastisite İndisi	CBR (%)	
		Taban Seviyesi Altındaki Su Derinliği	
		600 mm'den fazla	600 mm ya da daha az
Yağlı kil	70	2	1
	60	2	1.5
	50	2.5	2
	40	3	2
Siltli kil	30	5	3
Kumlu kil	20	6	4
	10	7	5
Silt	-	2	1
Kum (kötü derecelenmiş) non-plastik		20	10
Kum (iyi derecelenmiş) non-plastik		20	15
İyi derecelenmiş kum-çakıl, non-plastik		60	20

Zeminin dona karşı hassasiyetinin olup olmadığı dikkat edilmesi gereken bir konudur. Yol Araştırma Laboratuvarı'nın (RRL) raporunda (LR 90) verilen bilgiler zemin hassasiyetinin değerlendirilmesi konusunda yeterince aydınlatıcı olacaktır (R.R.L.,1970).

2.2.4.2 Drenaj

Yeraltı suyu seviyesinin formasyon seviyesine mesafesi 600 mm'nin altına düşmemelidir. Bu zemin altı drenajıyla veya formasyon seviyesinin dolgu yapılmak suretiyle yükseltilmesiyle sağlanabilir. Bu alternatiflerden birisi yapılamadığı

taktirde *Tablo 2.3*'te yüksek yeraltı suyu seviyesiyle ilgili yer alan bilgiler kullanılabilir. Gerek inşaat sırasında gerekse yolun ömrü boyunca hem zemindeki hem de yolun diğer tabakalarındaki suyun iyi bir drenajla uzaklaştırılması çok önemli bir konudur. İnşaat sırasında çeşitli yöntemler kullanılarak tabakaların yalıtılması ve su geçirmezliğin sağlanması iyi olur (R.R.L.,1970).

2.2.4.3 Alt Temel

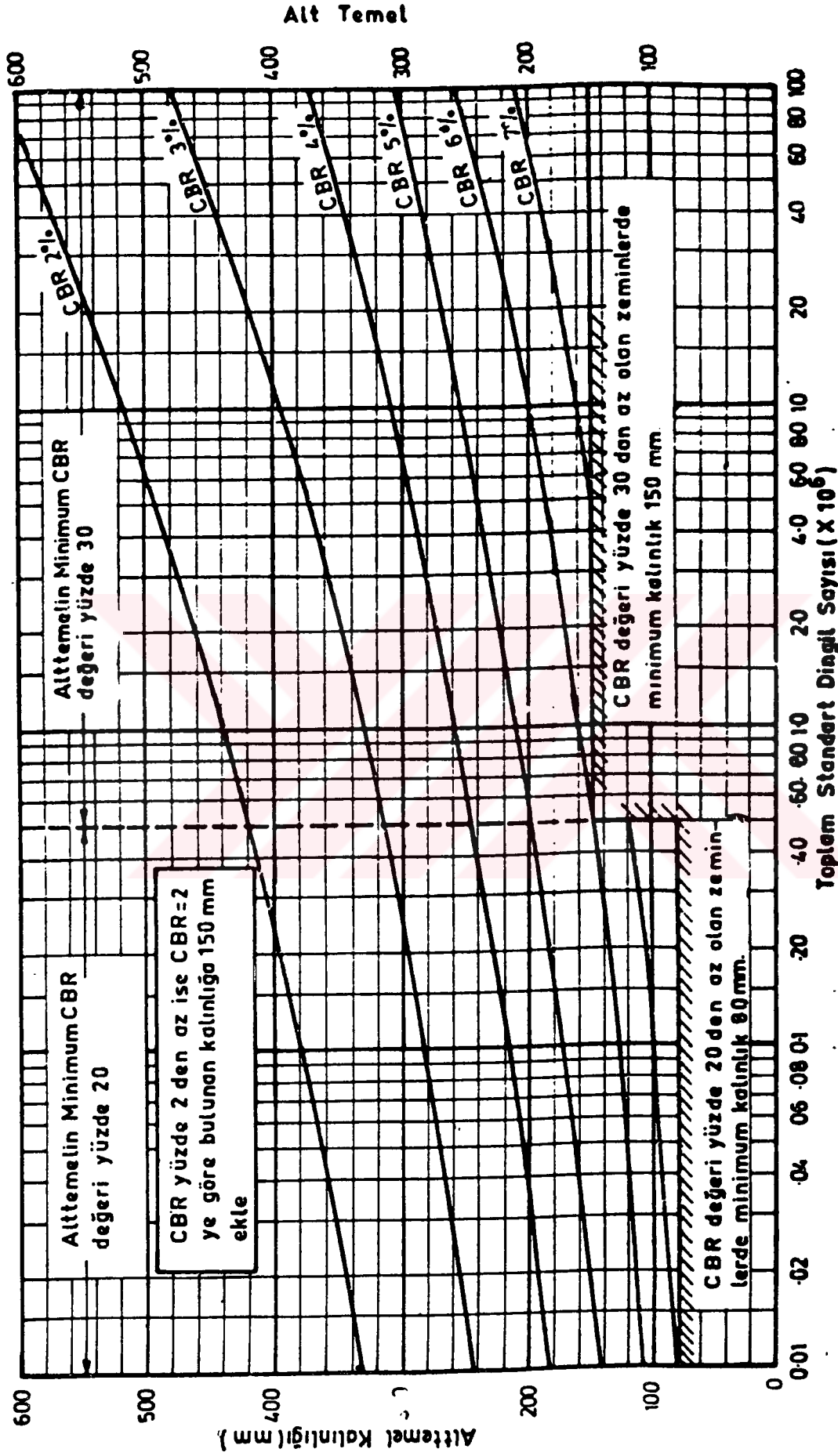
Gerekli alt temel kalınlığı, taşınacak olan toplam standart dingil sayısı ve zeminin CBR değeri kullanılarak *Şekil 2.6*'dan bulunabilir. *Tablo 2.3*'te verilen CBR değerinin %2'den küçük olması durumunda %2'lik CBR değeri için gerekli alt temel kalınlığına 150 mm'lik bir ekleme yapılmalıdır (R.R.L.,1970).

Yol yüzeyinden 450 mm aşağıya kadar olan bölgede, 2 milyon standart dingilden az yük taşımak için tasarlanan yollar hariç olmak üzere, dona duyarlı malzeme bulunmamalı; üstyapı, tasarımı bitirildikten sonra tekrar gözden geçirilip, eğer gerekiyorsa, alt temel kalınlığı toplam kalınlık 450 mm'den az olmayacak şekilde ayarlanmalıdır (R.R.L.,1970).

İki milyon standart dingilden az yük taşımak üzere tasarlanan yollarda dona duyarlı zemin üzerindeki 450 mm'lik toplam kalınlık ağır kış şartları da dikkate alınarak mümkün olduğu ölçüde azaltılabilir (R.R.L.,1970).

0.5 milyon toplam standart dingilden az yükler için alt temelin en düşük CBR değeri %20 alınmalıdır. Eğer eklenik trafik bu değerden fazla ise alt temelin CBR değeri %30 alınır.

Zeminin CBR değeri alt temel için gerekli olan en düşük değeri aşarsa alt temel yapılması gerekmez. Alt temelin gerekli olduğu durumlarda minimum kalınlıklar; toplam trafik 0.5 milyon standart dingilden azsa 80 mm, çoksa 150 mm'dir (*Şekil 2.6*).



Şekil 2.6. Alt temel kalınlığı

2.2.4.4 Temel

Temel malzemeleri zayıf beton, yoğun katran makadam, yoğun bitüm makadam, rolled asfalt, ıslak karışım makadam, kuru bağlayıcıli makadam, çimentolu zemin ve çimento bağlayıcıli granüler malzemedan oluşur.

2.5 milyon standart dingilden az yükler için tasarlanan yollarda yukarıda adı geçen malzemeler dışında, söz konusu trafik şartları altında uygunluğu tecrübelerle ispatlanmış malzemeler de kullanılabilir. Bu malzemeler don etkisine karşı duyarlı olmamalıdır (R.R.L.,1970).

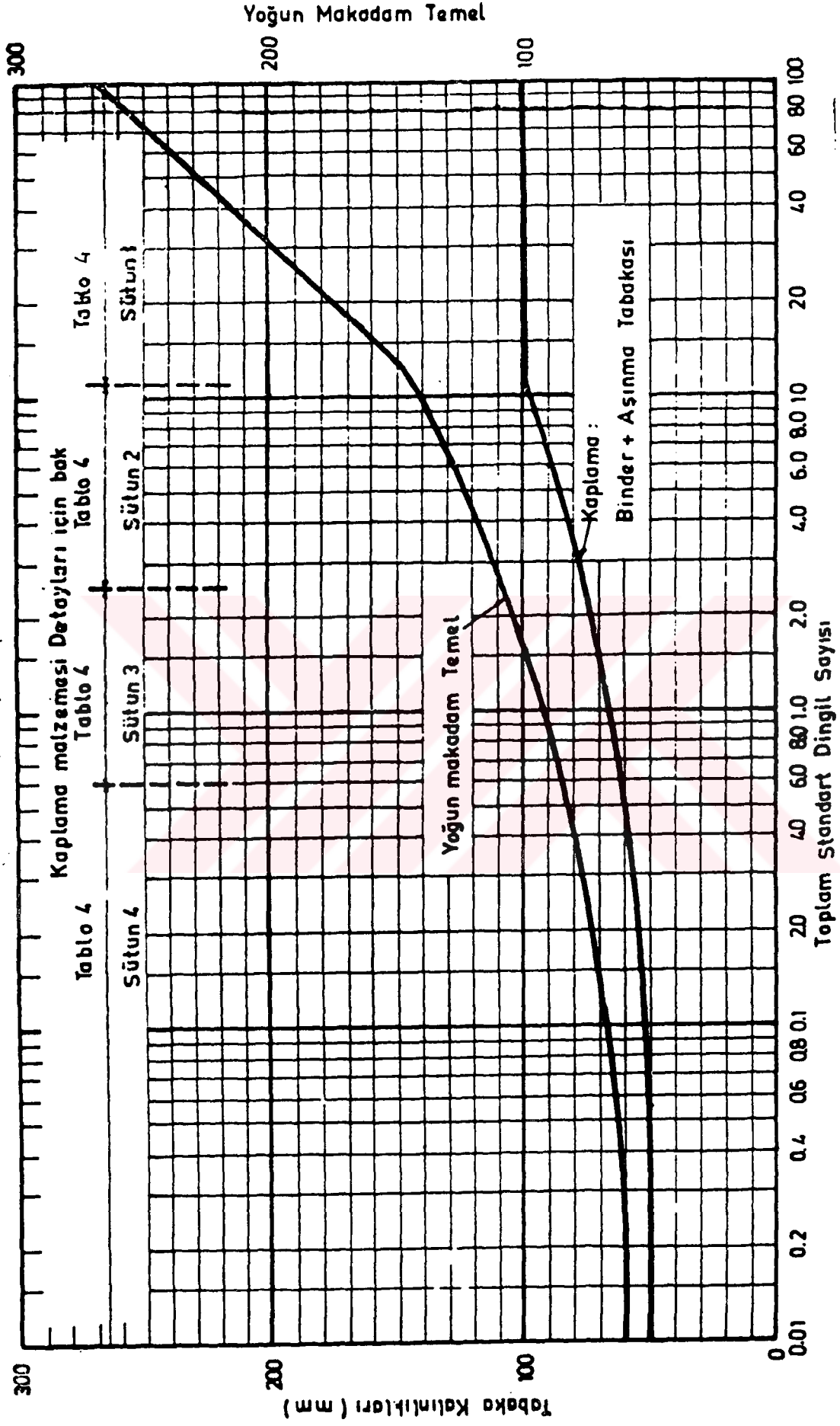
*Şekil 2.7 - 2.10'*da, verilen toplam standart dingil sayıları için yukarıda adı geçen malzemelere ait kalınlıklar verilmiştir.

Çimentolu zemin temeller, yalnızca, toplam standart dingil sayısının 1.5 milyondan az olduğu durumlarda kullanılmalıdır. Gerekli kalınlık *Şekil 2.9'*dan bulunabilir. Çimentolu granüler temeller için 5 milyondan az toplam standart dingil yükünün gözlemlendiği yerler uygundur. Gerekli temel kalınlığı *Şekil 2.9'*dan bulunur.

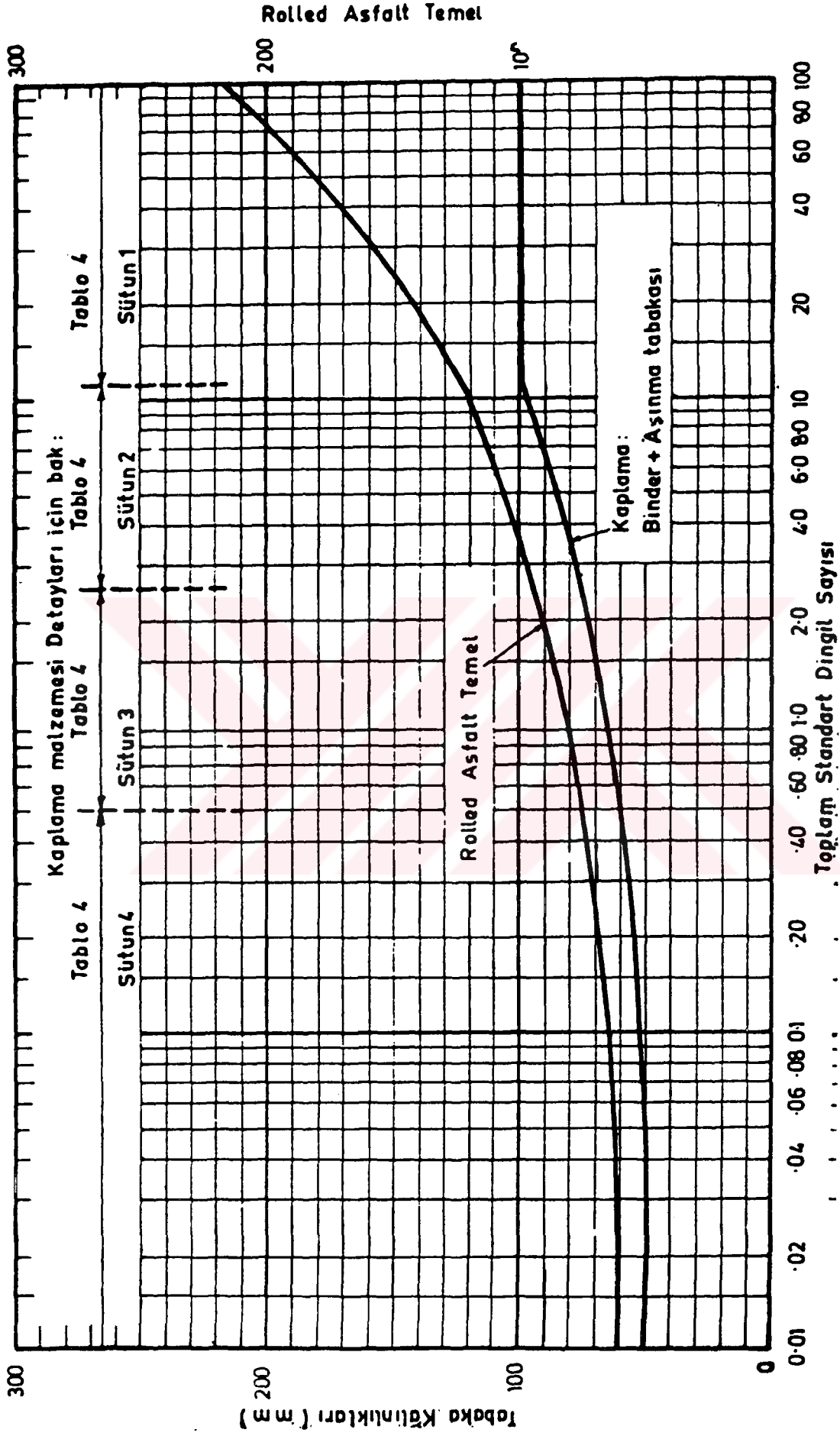
Temel tabakasında zayıf beton, ıslak karışım veya kuru bağlayıcıli makadam kullanılması durumunda gerekli olacak en düşük kalınlık *Şekil 2.9* ve *Şekil 10'*da verilmiştir. 11 milyon standart dingilin üzerindeki toplam trafik için aşınma tabakası ve binder tabakasının toplam kalınlığı 100 mm'dir (*Tablo 4*). *Şekil 2.9* ve *Şekil 10'*da gösterilen 100 mm'nin üzerindeki ek yüzey kalınlığı için en başta ve *Tablo 2.4 - Sütun 1'*de belirtilen temel malzemeleri ıslak karışım makadam, kuru bağlayıcıli makadam veya zayıf beton temel malzemeleri ile bir kompozit temel oluşturmak için kullanılabilir.

2.2.4.5 Kaplama Tabakası

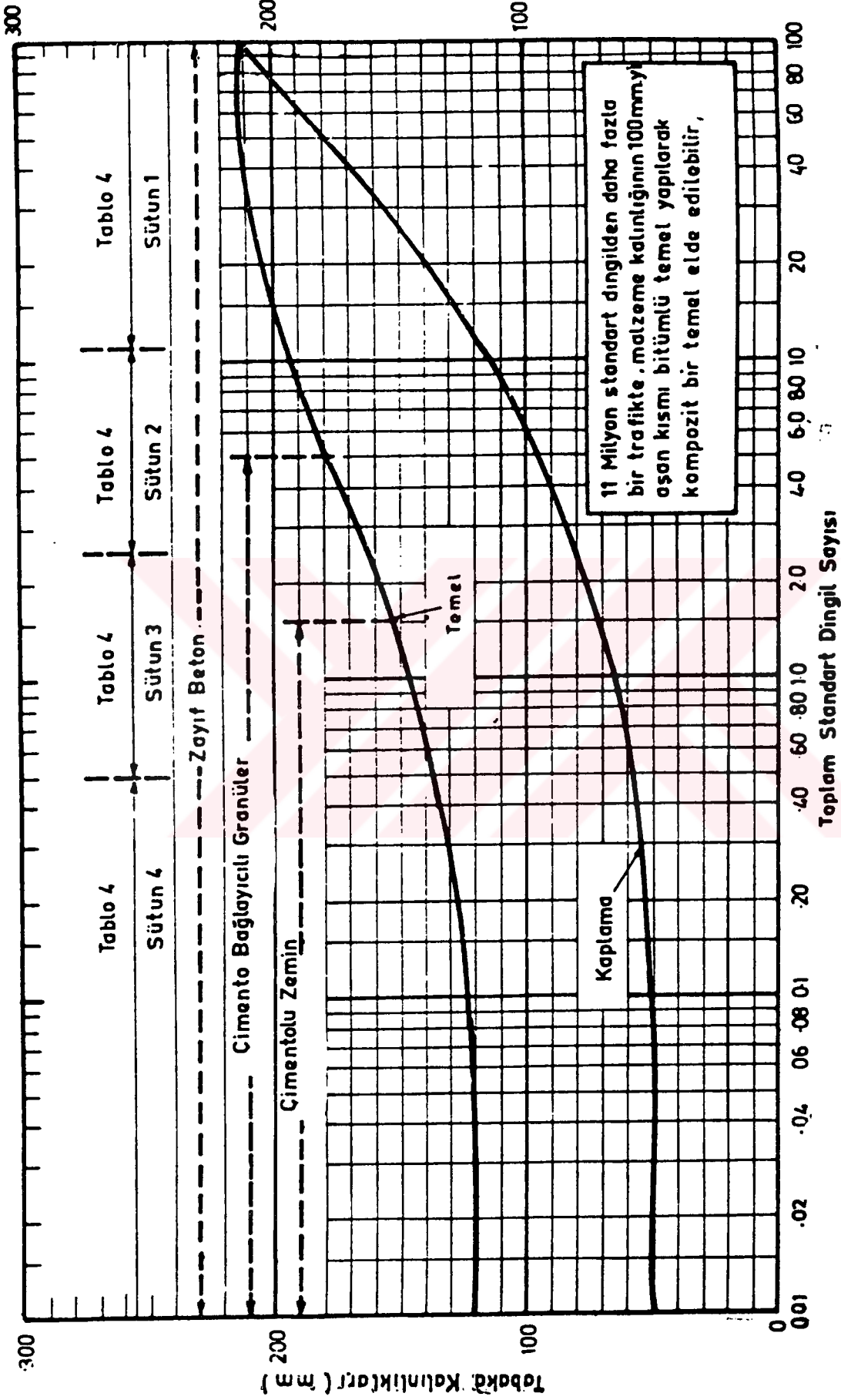
Taşınacak toplam standart dingil sayısı için önerilen kaplama kalınlığı kullanılan malzemeye bağlı olarak *Şekil 2.7 - 2.10'*da verilmiştir. Yüzey kaplaması için önerilen malzemeler taşınacak toplam trafiğe ve *Tablo 2.4'*teki ayrıntılara göre değişir.



Şekil 2.7. Yoğun Makadam Temel: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar

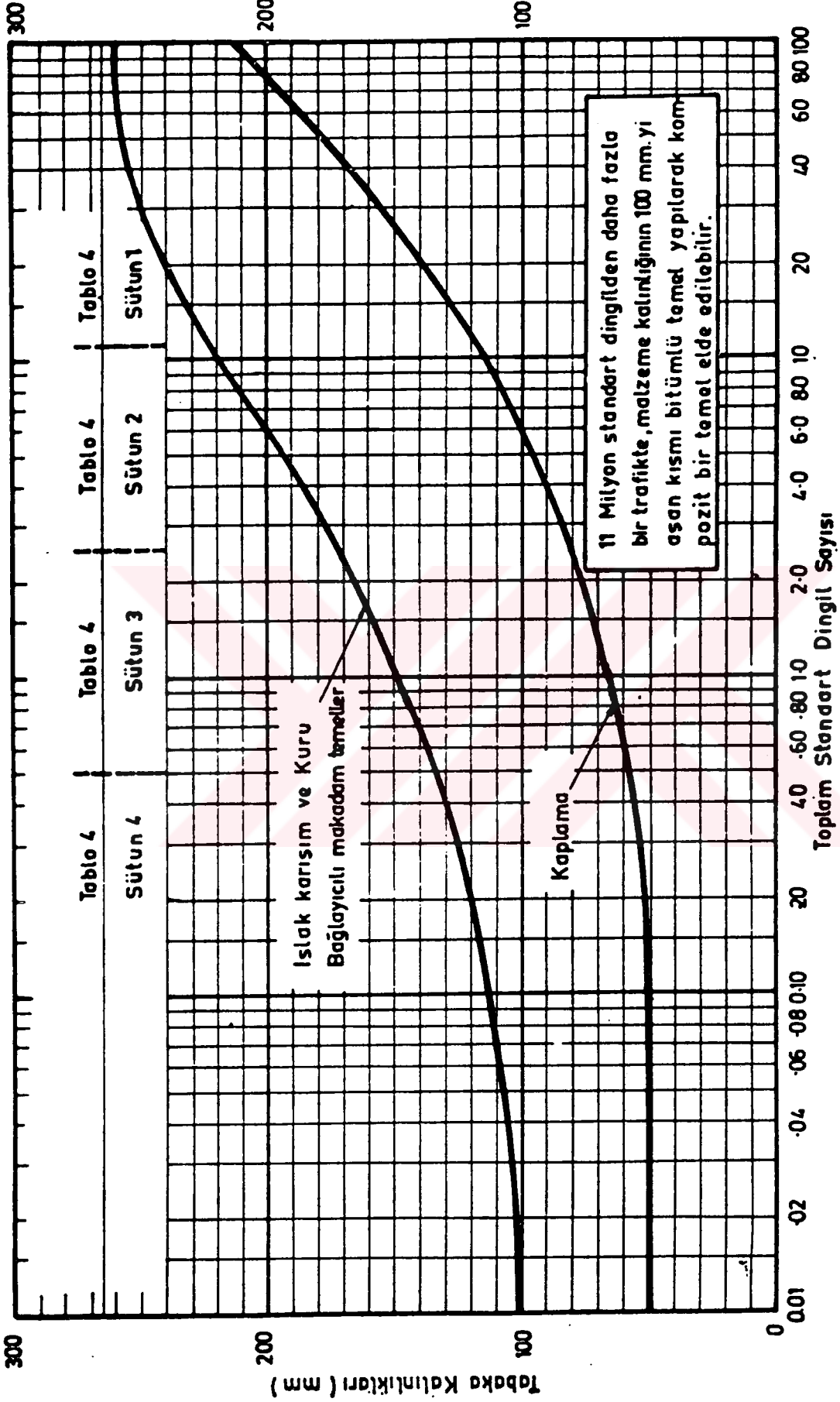


Zayıf Beton, Çimentolu Zemin ve Çimento Bağlayıcılı Granüler Temeller



Şekil 2.9. Zayıf Beton, Çimentolu Zemin ve Çimento Bağlayıcılı Granüler Temeller: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar

Islak-karışım ve kuru bağlayıcı makadam temeller



Şekil 2.10. Islak Karışım ve Kuru Bağlayıcı Makadam Temeller: Kaplama ve temel için minimum kalınlıklar

Kaplama tabakası toplam trafiğin 0.5 milyon standart dingilden az olduğu yerler dışında iki tabaka halinde serilir. Aşınma tabakası için tavsiye edilen kalınlıklar *Tablo 2.4*'te verilmiştir (R.R.L.,1970).

Tablo 2.4 Yeni yapılacak üstyapılarda kullanılabilen bitümlü kaplamalar (Bkz. Not 1)

Trafik (Toplam Dingil Sayısı)			
11 Milyondan çok (1)	2.5 - 11 Milyon (2)	0.5 - 2.5 Milyon (3)	0.5 Milyondan az (4)
AŞINMA TABAKASI MINIMUM KALINLIK 40 mm	(Sadece kırmataş veya kaba cüruf agregası kullanılabilir) (pitch-bitüm bağlayıcı kullanılabilir)	AŞINMA TABAKASI MINIMUM KALINLIK 20 mm Rolled asfalt, BS 59 (pitch-bitüm bağlayıcı kullanılabilir) Yoğun katranlı kaplama. BTIA Şartnamesi Soğuk asfalt, BS1690 (Bkz. Not 4) Orta-Bünyeli Katranlı makadam, BS 802 (üzerine derhal sathi kaplama yapılmalıdır) (Bkz. Not 4) Yoğun bitümlü makadam, BS 1621 (Bkz. Not 4)	İKİ TABAKA a) AŞINMA TABAKASI MINIMUM KALINLIK 20 mm Soğuk asfalt, BS1690 (Bkz. Not 4) Kaplanmış makadam, BS 802, BS 1621, BS 1241 veya BS 2040 (Bkz. Not 2 ve 4) b) BİNDER TABAKASI Kaplanmış makadam, BS 802, BS 1621, BS 1241 veya BS 2040 (Bkz. Not 2)
BİNDER TABAKASI MINIMUM KALINLIK 60 mm Rolled asfalt, BS 594 (Bkz. Not 2) Yoğun bitümlü makadam veya Yoğun katranlı makadam (sadece kırmataş ve cüruf kullanılır)	BİNDER TABAKASI Rolled asfalt, BS 594 (Bkz. Not 2) Yoğun bitümlü makadam veya Yoğun katranlı makadam (Bkz. Not 3)	BİNDER TABAKASI Açık-Bünyeli Bitümlü makadam, BS 1621 (Bkz. Not 4) BİNDER TABAKASI Rolled asfalt, BS 594 (Bkz. Not 2) Yoğun bitümlü makadam veya Yoğun katranlı makadam Tek-tabaka katranlı makadam, BS 802 veya BS 1241 (Bkz. Not 2 ve 5) Tek-tabaka bitümlü makadam, BS 1621 veya BS 2040 (Bkz. Not 2 ve 5)	TEK TABAKA Rolled asfalt, BS 954 (pitch-bitüm bağlayıcı kullanılabilir) Yoğun katranlı kaplama, BTIA Şartnamesi Orta-Bünyeli Katranlı makadam BS 802 (üzerine derhal sathi kaplama yapılmalıdır) (Bkz. Not 4) Yoğun bitümlü makadam, BS 1621 (Bkz. Not 4) 60 mm'lik tek-tabaka katranlı makadam, BS 802 veya BS 1241 (üzerine derhal sathi kaplama yapılmalıdır) (Bkz. Not 4) 60 mm'lik tek-tabaka bitümlü makadam, BS 1621 veya BS 2040 (Bkz. Not 4)
NOT: 1. Bitümlü kaplamaların bütün tabaka kalınlıkları, ilgili İngiliz Standardı (BS) Şartnamelerine uygun olmalıdır. 2. Kalkerden başka çakıl kullanıldığı zaman karışıma % 2 oranında Portland çimentosu ilave edilmeli ve ince agregaya yüzdesi buna göre azaltılmalıdır. 3. 2.5 milyon standart dingilden daha fazla trafik taşımak üzere tasarımılandırılmış yollarda, binder tabakasında çakıllı katranlı makadam kullanılması tavsiye edilmez. 4. Aşınma tabakası rolled asfalt veya yoğun katranlı kaplama değilse ve aşınma tabakasının üzerine derhal sathi kaplama yapılması düşünülmüyorsa, yapıya su girişini önlemek için temel tabakasının veya binder tabakasının üzeri sathi kaplama ile kaplanmalıdır. 5. Rolled asfalt veya yoğun katranlı kaplama bir aşınma tabakasının altındaki binder tabakası, rolled asfalt, BS 594 veya yoğun kaplanmış makadam olarak yapılmalıdır.			

Ana yollarda aşınma tabakasının serilmesinin gecikmesi trafikte aksamalara ve yüzey suyu drenajında problemlerle karşılaşılmasına yol açar. Bu tip işlerde malzemelerin sıkı kontrolü ve inşaat yöntemlerinin temel ve binder tabakasında iyi sıkıştırma yapılmasını sağlamasıyla daha sonra trafikten ileri gelecek sıkışma daha aza indirgenir.

Trafikte aksamaların söz konusu olmayacağı durumlarda, trafik altında sıkışma oluşana kadar, aşınma tabakasının serilmesi ertelenebilir. Bu işlem 6 - 12 ayla sınırlandırılmalıdır (R.R.L.,1970).



BÖLÜM 3

ANALİTİK YÖNTEMLER

3.1 GİRİŞ

Analitik yaklaşımda teorik analiz ve bitümlü malzemelerin özellikleri kullanılır ve prensip olarak her türlü tasarım durumuna cevap verebilir. Analitik Tasarım Yöntemleri'nde, üstyapı, diğer inşaat mühendisliği yapıları gibi ele alınır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, tahmini trafik yükü ve çevresel koşullar dikkate alınarak bilgisayar programları ve abaklardan yararlanmak suretiyle tabaka kalınlıkları belirlenir.

Analitik tasarım yöntemleri üstyapının viskoelastik veya elastik bir taban zemini üzerine oturduğu viskoelastik veya elastik, rijit sistem olarak modellenebileceği kabulüne dayanır. Bu kabulden sonra üstyapının üstünde veya altında bulunan herhangi bir noktadaki, trafik yüklerine ve çevresel etkilere bağlı olarak oluşan gerilme, şekil değiştirme ve defleksiyon hesaplanabilir (BROWN,1990) .

Analitik tasarım yönteminde temel aşamalar aşağıdaki gibidir:

1. Yüklerin belirlenmesi,
2. Üstyapıyı oluşturan bileşenlerin boyutlarının belirlenmesi,
3. Teorik prensipler kullanılarak üstyapının kritik noktalarındaki basınç, gerilme ve yer değiştirmelerin belirlenip sistemin çözülmesi,
4. Elde edilen sonuçların izin verilen değerlerle karşılaştırılıp tasarımın yeterli olup olmadığının belirlenmesi,
5. Tatmin edici bir sonuca ulaşana kadar malzeme ve geometrilere ayarlamalar yaparak 2, 3 ve 4. adımların tekrarlanması,

6. Sonucun ekonomik yönden irdelenmesi.

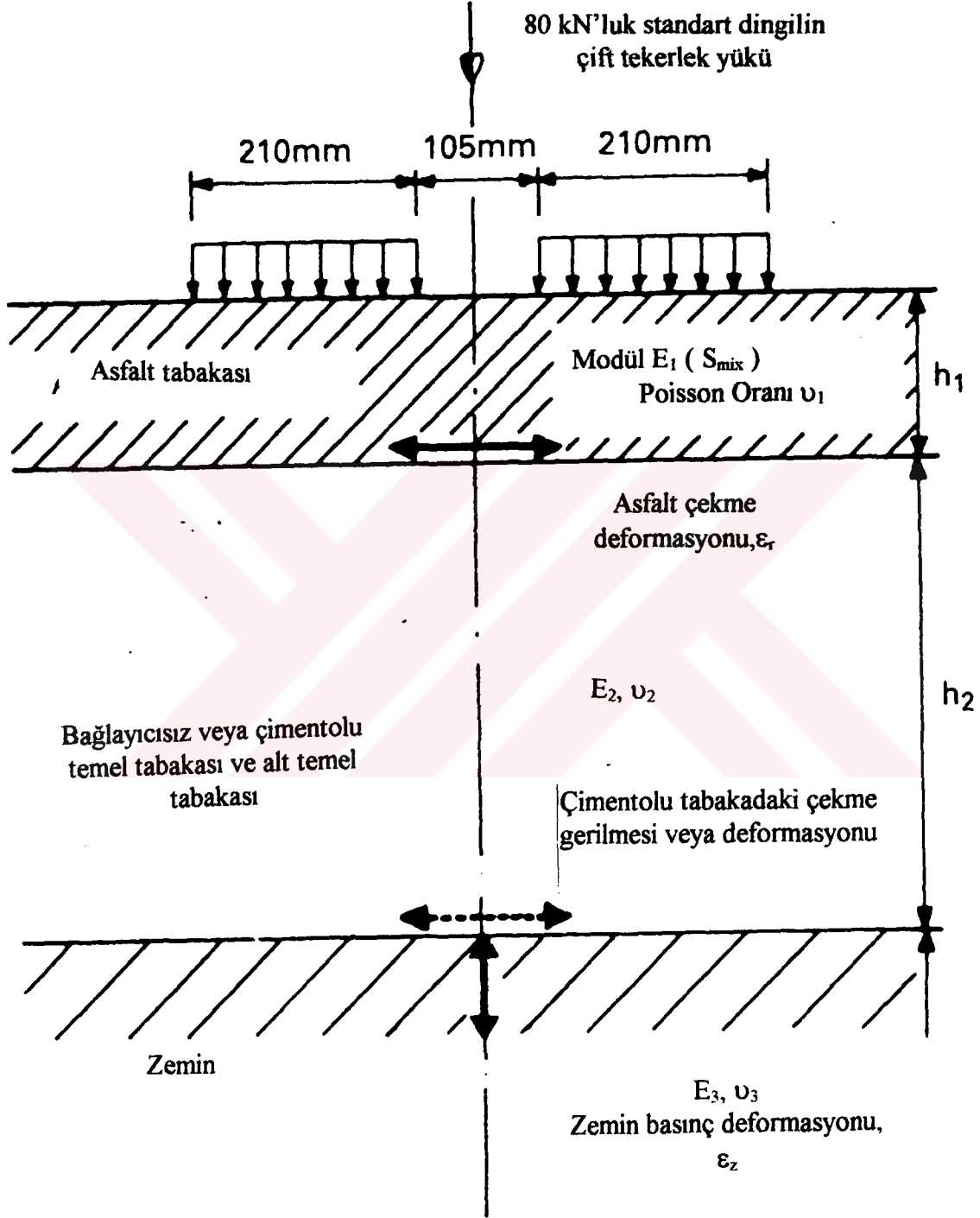
Son yirmi-yirmi beş yıldır sürdürülen araştırmalarla analitik tasarım yöntemlerinde önemli gelişmeler olmuş ve bu konuda çok çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiştir. En başta yalnızca büyük şirketler tarafından kullanılan bu programlardan, kişisel bilgisayarların yaygınlaşmasıyla çok sayıda mühendis de yararlanmaya başlamıştır.

3.2 SHELL ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMİ*

Analitik üstyapı tasarımı yeni bir fikir değildir. 1926 yılında Westergaard tarafından rijit üstyapılardaki gerilmelerin hesaplanması için bir yöntem geliştirilmiştir. 1950'lerin sonlarına doğru analitik tasarım yöntemlerine duyulan ilgi artmış ve 1963 yılında Shell tarafından, esnek üstyapıların tasarımına yönelik, laboratuvar testleri ve AASHO Yol Testi'nin sonuçlarından derlenen bir grup tasarım çizelgesi yayınlanmıştır. Sonraki yıllarda yöntem kapsamlı bir tasarım paketi geliştirilmek üzere malzeme özellikleri, trafik yüklemesi ve sıcaklık etkilerini içine alacak şekilde genişletilmiş ve güncelleştirilmiş, sonuçta ortaya Shell Üstyapı Tasarım Rehberi (SPDM 1978) çıkmıştır. 1985'te yapılan çeşitli eklemelerle de SPDM 1978'in güncelleştirilmesi yapılmıştır. Bu iki yayın üstyapıların bilgisayar modellerine dayanmakla birlikte sahada çalışan ve gelişmiş bilgisayar imkanlarından yoksun mühendisler için grafik, çizelge ve tablolardan oluşan bir tasarım yöntemi de sunmaktadır (CALESSEN. ve diğ. 1977)

SPDM üstyapıyı, *Şekil 3.1*'de görüldüğü gibi, mevcut zemin, onun üzerindeki bağlayıcısız granüler malzemeden oluşan temel ve temelin üzerini kaplayan bitümlü tabakadan oluşan çok katlı bir lineer elastik sistem olarak ele alır.

*Bu bölümdeki tablo ve şekiller S.P.L. M. 1978'den alınmıştır.



ŞEKİL 3.1. Esnek üstyapının basitleştirilmiş şekli

Asfalt tabakası ve alt temel düzeyde yarı sonsuz homojen zemin üzerindeki sonsuz yatay genişlik ve uniform kalınlıktaki homojen malzemeler olarak düşünülür. Üstyapının ömrü yapının öngörülen hasar derecesi oluşana kadar taşınacağı tahmin edilen toplam standart dingil sayısı ile ifade edilir (BROWN,1990).

Yöntemin prensibi üstyapıya uygulanan trafik yüklemesi sonucu alt temel ile zemin arasında aşırı deformasyon oluşumunu ve bitümlü tabakada yapısal çatlak oluşmasını önleyecek asfalt tabakasını tasarlamaktır.

Yöntemde malzemeler Young Elastisite Modülü ve Poisson Oranı ile karakterize edilmiş, homojen ve izotropik olarak düşünülmüştür.

SPDM 1978 %2'den %30'a kadar olan CBR değerleriyle alt temel özelliklerini göz önünde bulundurularak ve asfalt karışımının değişkenlerini 8 standart karışım tipiyle sınırlandırarak muhtemel seçenekleri ortaya koymuştur. Bu yaklaşımda geniş bir aralıktaki belirli şartları ve karışımları kapsayan bitümlü üstyapıların tasarımına esas oluşturan 296 adet çizelge vardır (CALESSEN ve diğ.,1977).

3.2.1 Tasarım Ölçütleri

Standart dingil yüklemesinden ileri gelen deformasyon tekrarları ile zeminde oluşan basınç deformasyonu ve asfaltta oluşan çekme deformasyonu arasındaki ilişkiler üstyapı modelindeki önemli mekanizmalar olarak kabul edilmiştir.

BISAR (**B**itumen **S**tress **A**nalysis in **R**oads) programı kullanılarak üstyapı içindeki maksimum gerilme ve deformasyonların oluştuğu noktaların yerleri modül ve tabaka kalınlığı değerlerinin geniş bir aralığı için belirlenir. Bu işlem sırasında dikkate alınan başlıca ölçütler aşağıda verilmiştir.

- Taban zemininin yüzeyindeki, taban zemininde oluşan kalıcı deformasyonu kontrol eden, basınç deformasyonu (ϵ_z),
- Asfalt tabakasındaki, asfalt kaplamadaki çatlak oluşumunu kontrol eden, yatay çekme deformasyonudur (ϵ_r).

Normal yükleme şartları (çift tekerlekli düşey yük) için her ikisinin de en büyük değerleri ya yük alanının ortasından geçen düşey ekseninde ya da iki yüklü alanın ortasındaki düşey simetri ekseninde oluşur.

Yapılan hesaplamalar sonucunda en büyük yatay deformasyonun olduğu seviye “C” parametresine bağlı olarak bulunmuştur.

$$C = h_1 \cdot \frac{E_1}{E_2}, \text{ mm} \quad (3.1)$$

Formülde;

$E_1 (S_{mix})$: Asfalt tabakasının modülü (N / m^2)

E_2 : Temel tabakasının modülü (N / m^2)

h_1 : Asfalt tabakasının kalınlığı (mm)

$C > 133$ mm ise maksimum asfalt deformasyonu tabakanın en altında değildir. Böyle bir durumda $h_1 \leq 200$ mm ise en büyük gerilme tabakanın alt yarısında, $h_1 > 200$ mm ise üst yarısındadır (MIHT, 1997).

1974 yılında Shell araştırmacıları AASHO Yol Testi'nin sonuçlarının ekstrapolasyonu ile geliştirilen BISTRO (**B**itumen **S**tructures in **R**Oads) programını kullanarak bir zemin ölçütü oluşturdular. Bu ölçüt tam ölçekli yol deneylerinden çıkarıldığı için enine tekerlek yükü dağılımı ve statik-dinamik tekerlek yükleri gibi faktörleri otomatik olarak içeriyordu. Hesaplanan gerilmelerin istatistiki analiziyle farklı güven düzeyleri için aşağıdaki zemin gerilme ölçütleri elde edilmiştir (CALESSEN ve diğ.1977).

$$\%50 \text{ güvenli} : \quad \epsilon_z = 2.8 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} \quad (3.2)$$

$$\%85 \text{ güvenli} : \quad \epsilon_z = 2.1 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} \quad (3.3)$$

$$\%95 \text{ güvenli} : \quad \epsilon_z = 1.8 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} \quad (3.4)$$

Bu formülde ;

ϵ_z : Zeminin en üst noktasındaki düşey deformasyon

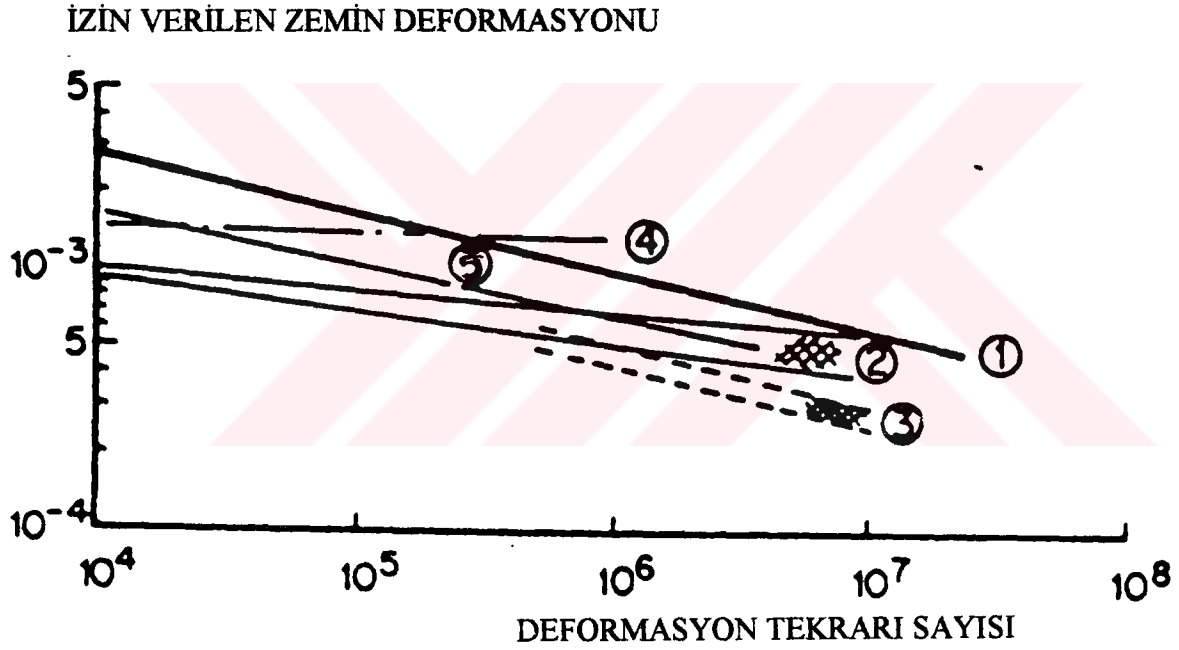
N : Yükün uygulanma sayısı

Ölçüt geliştirilirken tüm tabakalar için Poisson Oranı, $\nu = 0.35$ alınmıştır. Zemindeki izin verilen basınç deformasyonu mevcut servis yeteneği indisi $PSI = 2.5$ için çift tekerlek yükü uygulamalarının bir fonksiyonu olarak *Şekil 3.2*'de verilmiştir.

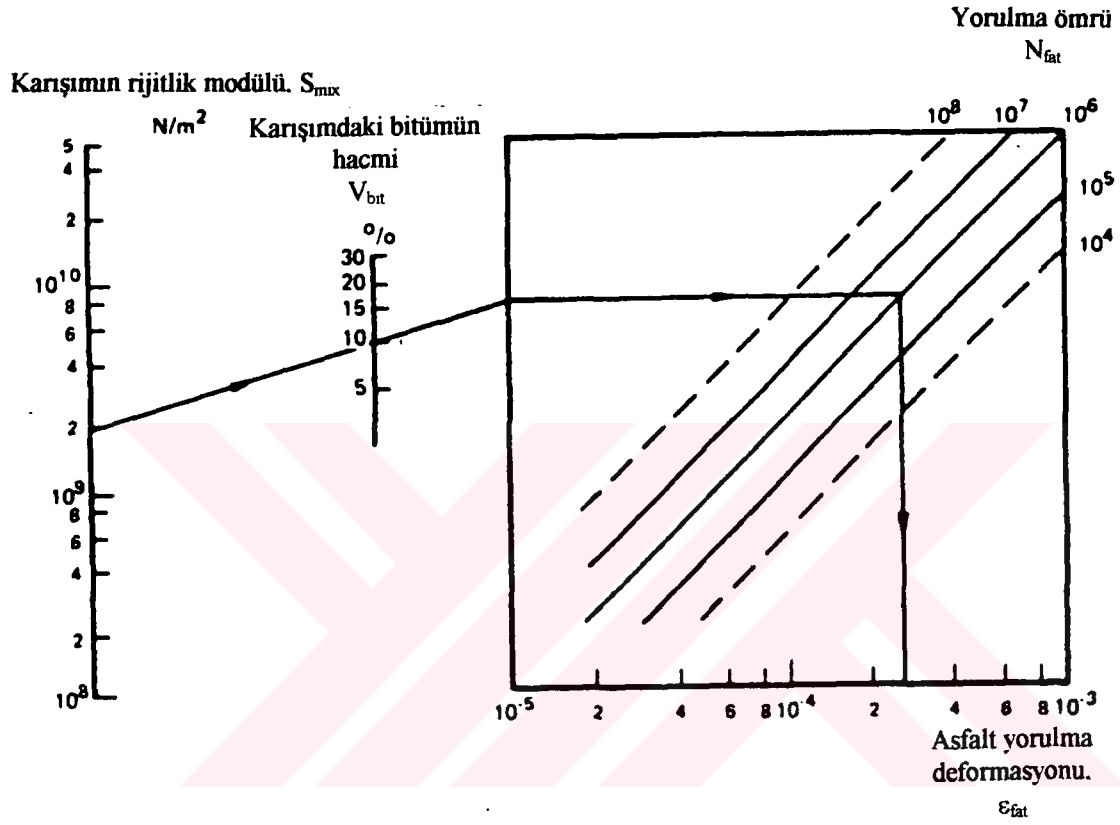
Yukarıda verilen bağıntılar CBR yöntemine uygun olarak tasarlanan yapıların analizi sonucunda bulunanlarla uyum içindedir. Bağıntının dingil yükünden ve zemin modülünden bağımsız olduğu ispatlanmıştır. Diğer araştırmacıların kullandığı bazı izin verilebilir zemin deformasyonu ölçütleri de karşılaştırma için *Şekil 3.2*' de verilmiştir (CALESSEN ve diğ.1977).

Asfalt tabakası için yorulma ölçütü genellikle deformasyon tekrarlarının ve asfalt modülünün bir fonksiyonu olarak sunulan izin verilebilir deformasyona dayandırılmıştır. Asfalt deformasyonu (veya yorulma deformasyonu) ölçütünü geliştirmek amacıyla bitümlü malzemelerin yorulma özelliklerini gözlemlemek için farklı karışım tiplerini, test sıcaklıklarını ve yükleme frekansını içeren kapsamlı laboratuvar testleri yapılmıştır. SPDM, sabit deformasyon yorulması testlerinden elde edilen laboratuvar verilerini esas alarak, verilen karışım formülü için uygulanan yük miktarına bağlı oluşan asfalt deformasyonu ile ilgili bir nomograf içermektedir (*Şekil 3.3*) (CALESSEN ve diğ.1977).

1. EDWARDS/VALKERING, 1974 (YENİ KRİTER)
2. BRABSTON, BARKER VE HARVEY
3. FINN, NAIR VE MONISMITH
4. WITZACK
5. DORMON/METCALF, 1964 (İLK KRİTER)



ŞEKİL 3.2. Deformasyon tekrarlarının bir fonksiyonu olarak izin verilebilir taban zemini deformasyonu



ŞEKİL 3.3. S_{mix} ve V_b ' ye bağlı yorulma nomografi

$$\epsilon_r = (0.856 \cdot V_{bit} + 1.8) \cdot S_{mix}^{-0.36} \cdot N_{fat}^{-0.2} \quad (3.5)$$

Bu bağıntıda;

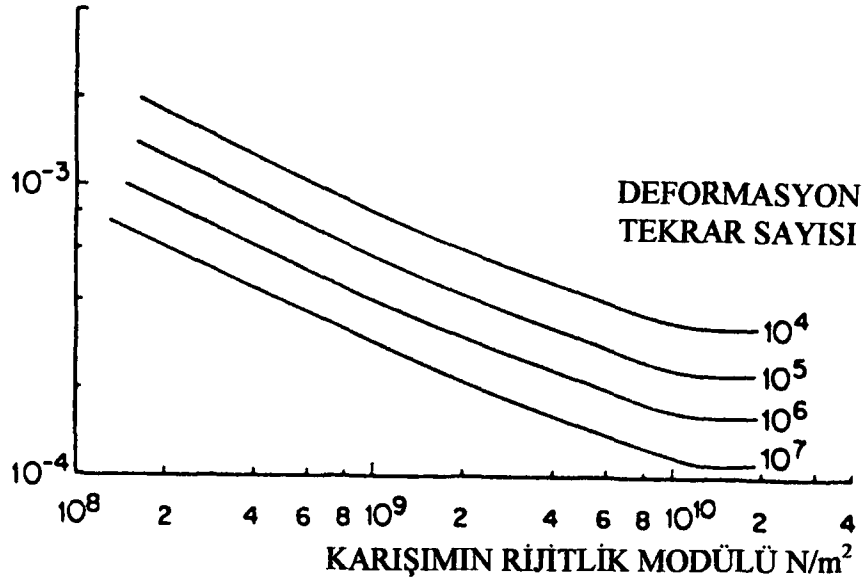
- ϵ_r : Asfaltta oluşan yatay çekme deformasyonu
 N_{fat} : ϵ_r deformasyonunun uygulanma sayısı
 V_{bit} : Karışımdaki bitümlü bağlayıcı hacmi (%)
 S_{mix} : Tasarım koşulları için karışımın rijitliği, (N / m²)

Yorulma testleri, çeşitli ülkelerde kullanılan tipik karışımları temsil eden bir çok farklı asfalt karışımı üzerinde yürütülmüştür. Bu karışımların bileşenleri *Tablo 3.1*'de verilmiştir.

İzin verilebilir asfalt deformasyonu sırasıyla yoğun ve zayıf bitümlü makadam için deformasyon tekrar sayısının ve rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak *Şekil 3.4* ve *Şekil 3.5*'te verilmiştir. *Şekil 3.6*'da ise 10⁶. Deformasyon tekrarı ve rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak çeşitli karışımlar için izin verilebilir asfalt deformasyonları gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi izin verilebilir deformasyon, karışımlara uygulanan deformasyon tekrar sayısı ve rijitlik modülleri için tek bir fonksiyon değildir, bununla birlikte karışıma bağlı bir değerdir (CALESSEN ve diğ.,1977).

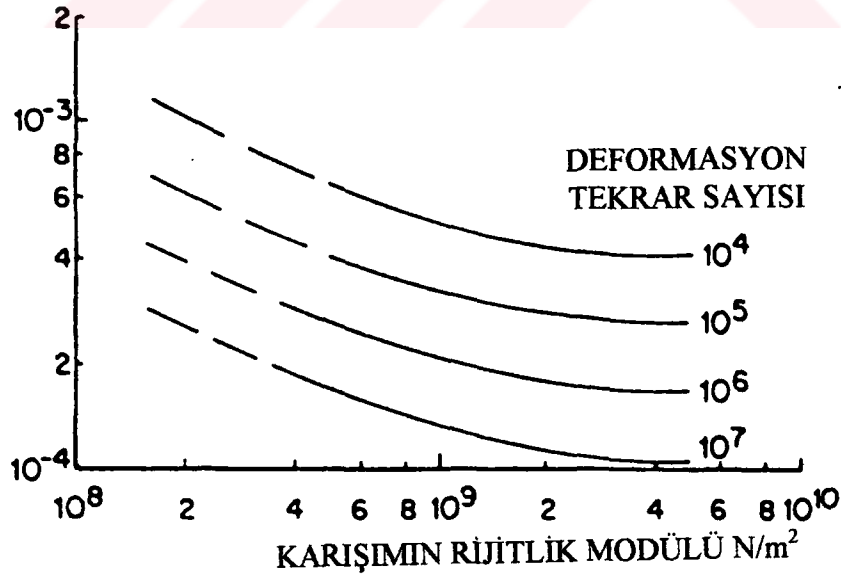
Sonuçların bazı karışımlar için birbirine çok yakın olması nedeniyle benzer karışımlar için tek bir bağıntı kullanılmıştır. Sonuçta yorulma eğrilerinin sayısı 5'e düşürülmüştür. Bu durum belirli sayıdaki deformasyon tekrarları için *Şekil 3.7*'de gösterilmiştir.

ASFALT YORULMA DEFORMASYONU



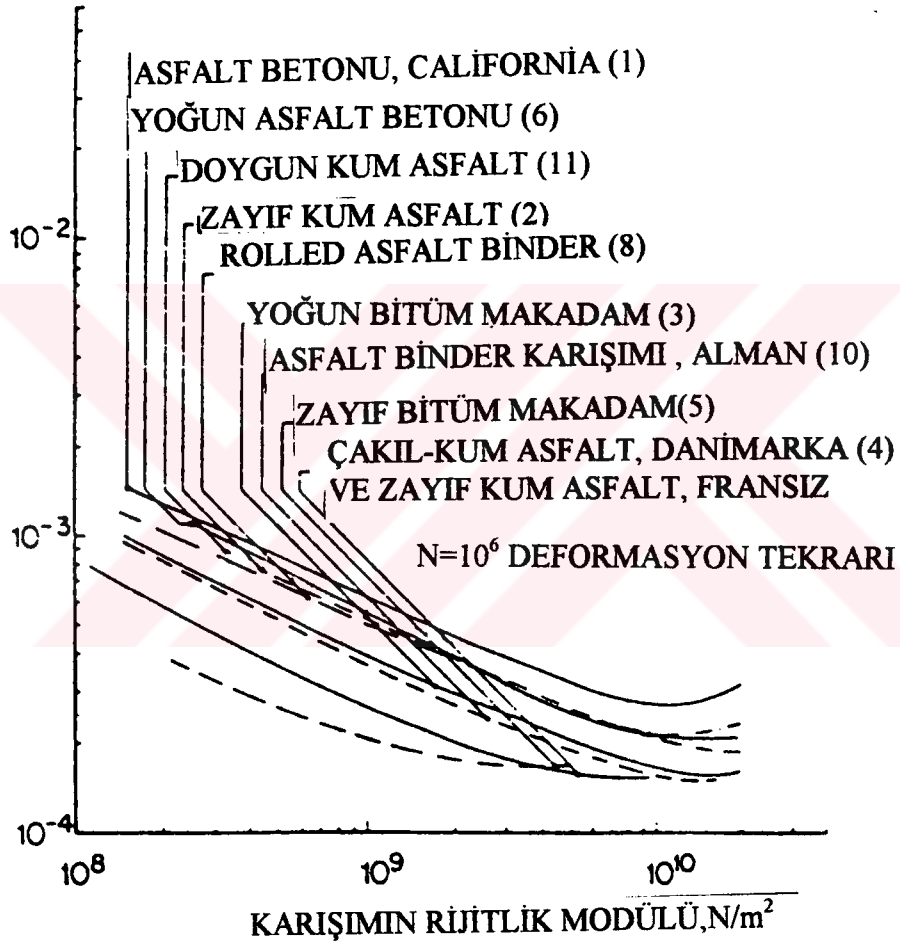
ŞEKİL 3.4. Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak izin verilebilir asfalt deformasyonu (Yoğun bitümlü makadam)

ASFALT YORULMA DEFORMASYONU



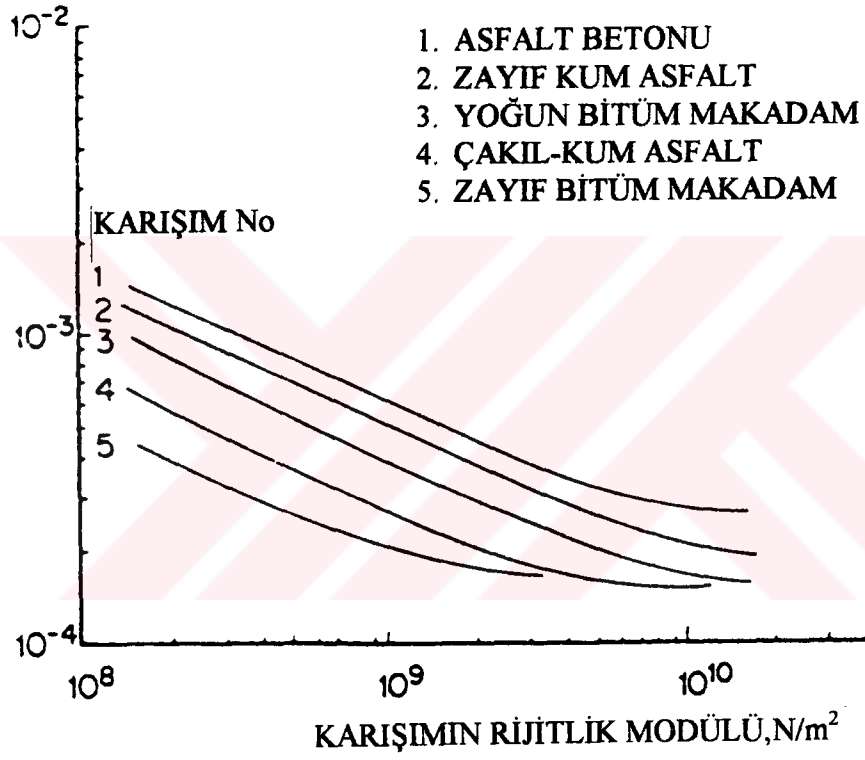
ŞEKİL 3.5. Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak izin verilebilir asfalt deformasyonu (Zayıf bitümlü makadam)

ASFALT YORULMA DEFORMASYONU



ŞEKİL 3.6. Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için izin verilebilir asfalt deformasyonu (parantez içindeki sayılar Tablo 3.1'deki karışımları gösterir)

ASFALT YORULMA DEFORMASYONU



ŞEKİL 3.7. Karışımın rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımları için izin verilebilir asfalt deformasyonu (Eğrilerin numaraları Tablo 3.1'deki karışımları gösterir)

3.2.2 Tasarım Verileri

Prensip olarak üstyapıların tasarımında birçok parametre kullanılır. Bunlar çevresel koşullar (sıcaklık, nem, rüzgar), yükleme koşulları (dingil yükleri, yük dağılımı, temas gerilmesi, temas yüzeyi alanı, yükleme süresi, dinamik etkiler) ve malzeme özellikleridir (modüller, Poisson Oranı, bozulma ölçütleri), ayrıca parametrelerin çoğu zamana bağlı olarak değişir. Pratik bir tasarıma yönelik çalışılabilir bir sistem geliştirmek için bazı sadeleştirmeler yapılmalıdır. Çeşitli parametreler için uygulanan yaklaşım aşağıda ele alınmıştır.

3.2.2.1 Trafik

Tasarım süresi boyunca üstyapıyı kullanacağı tahmin edilen dingil yükleri, her biri 600 kN / m² basınç gerilmesine ve 105 mm yarıçaplı yüklü alana sahip 20 kN' luk tekerleğe sahip 80 kN' luk eşdeğer standart dingil yüküne dönüştürülür. Bu dingil yükü bir çok ülkede standart tasarım yükü olarak kullanılır ve genelde üstyapıya en büyük hasarı veren dingil grubunu temsil eder. Diğer dingil yüklerinden (L) dönüştürme işlemi aşağıdaki formülle standart dingil yükü eşdeğer sayısı (n) hesaplanarak yapılır:

$$n = 2.4 \cdot 10^{-8} \cdot L^4 \quad (3.6)$$

Bu formülde (L) kN cinsindendir. Bağlantı AASHO Yol Testi' nden elde edilen yük eşdeğerliği faktörlerine dayanır. (AASHO Association of American State Highways Officials)

Büyük yolların çoğunda günlük yük tekrarlarının sayısının gün içinde üniform olarak dağıldığı kabul edilebilir. Tandem dingiller iki ayrı dingil halinde düşünülür. Temas yüzeyi ve temas gerilmeleri dağılımının büyüklüğü ile şeklindeki ufak oynamalar, zemin deformasyonu ve maksimum asfalt deformasyonu üzerindeki etkileri önemsiz olduğu için, ihmal edilebilir (CALESSEN ve diğ.1977).

Bir noktadaki yükleme süresi hızı, yüklemeyi yapan tekerleğin yanal dağılımına, üstyapı kalınlığına, yapıdaki derinliğe ve sıcaklığa bağlıdır. Prensip bu

değişkenliklere izin verilmekle birlikte 50 - 60 km / h hıza sahip ticari araçları temsilen yükleme süresinin $t = 0.02$ sn alınması daha pratik olur(CALESSEN ve diğ.1977).

3.2.2.2 İklim

Hava sıcaklıklarındaki değişiklikler, bağlayıcısız malzemelerin modülleri üzerinde belirli bir etkileri olmamakla beraber, asfalt özelliklerini önemli oranda etkiler. Ortalama yıllık veya aylık hava sıcaklıklarıyla asfalt tabakasının kalınlığına bağlı efektif asfalt sıcaklığı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir yöntem geliştirilmiştir.

Nem içeriğindeki ve yeraltı suyu seviyesindeki değişimler zemin modülünü ve Poisson Oranı'nı etkileyebilir. Don ve don çözülmesi dönemlerinin de zemin özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır (CALESSEN ve diğ.1977).

3.2.2.3 Malzeme Özellikleri

3.2.2.3.1 Zemin

Laboratuvar deneyleri ve tam ölçekli yol denemeleri sonucunda, malzeme modülleri uygun yükleme koşulları altında belirlendiği takdirde, üstyapı davranışını belirlemede lineer elastik teoremin kullanılabileceği görülmüştür. Bu nedenle zemin modülünün esas yerinde, gerçek trafiği temsil eden yükler altında dinamik defleksiyon ölçümleriyle belirlenmesi uygun olur. Bu tip imkanların ve verilerin mevcut olmadığı durumlarda CBR değeriyle dinamik zemin modülü (E_3) arasındaki ampirik bağıntı kullanılabilir:

$$E_3 = 10^7 \cdot \text{CBR} \quad (\text{N} / \text{m}^2) \quad (3.7)$$

Dinamik elastisite modülü (E_3) nisbeten yüksek frekanslarla ve küçük deformasyonlarla yapılan ölçümlerden elde edilebildiği halde CBR değeri fazla deformasyon olması durumunda belirlenebilir. Bu sebeple ikisi arasında doğrudan bir

ilişki olmamakla birlikte uygulamada ampirik bağıntının doğru sonuç verdiği görülmüştür (CALESSEN ve diğ.1977).

3.2.2.3.2 Bağlayıcısız Tabakalar

Zeminde olduğu gibi bağlayıcısız temel tabakalarının modülleri de büyük oranda gerilmeye bağlıdır. Teorik analizle desteklenen saha ölçümleri bağlayıcısız temel tabakası modülünün (E_2) temel tabakasının kalınlığına (h_2) ve altındaki zeminin modülüne (E_3) bağlı olduğunu aşağıdaki bağıntıyla göstermiştir:

$$E_2 = k_2 \cdot E_3 \quad (3.8)$$

$$k_2 = 0.2 \cdot h_2^{0.45}, \quad (2 < k < 4 \text{ ve } h_2 \text{'nin birimi mm'dir}) \quad (3.8a)$$

Malzemenin dayanabileceğinden daha yüksek çekme gerilmelerine sebep olacağı için bağlayıcısız temel tabakalarında daha büyük modüllere izin verilmez. Bununla birlikte temel tabakasının iki bağlayıcı tabakası arasına alınması durumunda daha büyük modül değerleri kullanılabilir (CALESSEN ve diğ.1977).

3.2.2.3.3 Çimentolu Temeller

Çimentolu temellerin elastisite modülü üstyapıdan kesilen örneklerle laboratuvarla dinamik eğilme testleri vb. uygulanarak bulunabilir. Bununla beraber bu şekilde belirlenecek malzeme modülünün kullanımdaki malzemenin modülünü yansıtacağı şüphelidir (CALESSEN ve diğ.1977).

Tasarımda kullanılacak tipik kum çimento modülü değerleri ($E = 5 \cdot 10^9 - 10^{10} \text{ N / m}^2$) kaynaklardan alınmıştır. Bu değerler dalga yayılımı ölçümlerinden elde edilen değerlerle aşağı-yukarı aynıdır.

3.2.2.3.4 Asfalt Kaplama

Asfalt karışımının rijitlik modülünün değeri 10^6 ile $5 \cdot 10^{10} \text{ N / m}^2$ arasında değişir. Rijitlik değerlerinin üst aralığı ($10^8 - 5 \cdot 10^{10} \text{ N / m}^2$) çok sayıdaki asfalt karışımı için dinamik veya yarı statik (örn. Sabit yükleme oranı) testlerle çeşitli sıcaklıklar

ve farklı yükleme şartları için belirlenmiştir. Bulunan modülün yalnızca bitüm içeriğine, bitümün rijitliğine ve karışımdaki boşluklara bağlı olduğu görülmüştür. Bitümün rijitliğini bulmak için Van der Poel nomografından yararlanılabilir (*Şekil 3.8*).

$$S_b = 1.157 \cdot 10^{-7} \cdot t^{-0.368} \cdot 2.718^{-PI_r} \cdot (SP_r - T)^5 \quad (3.9)$$

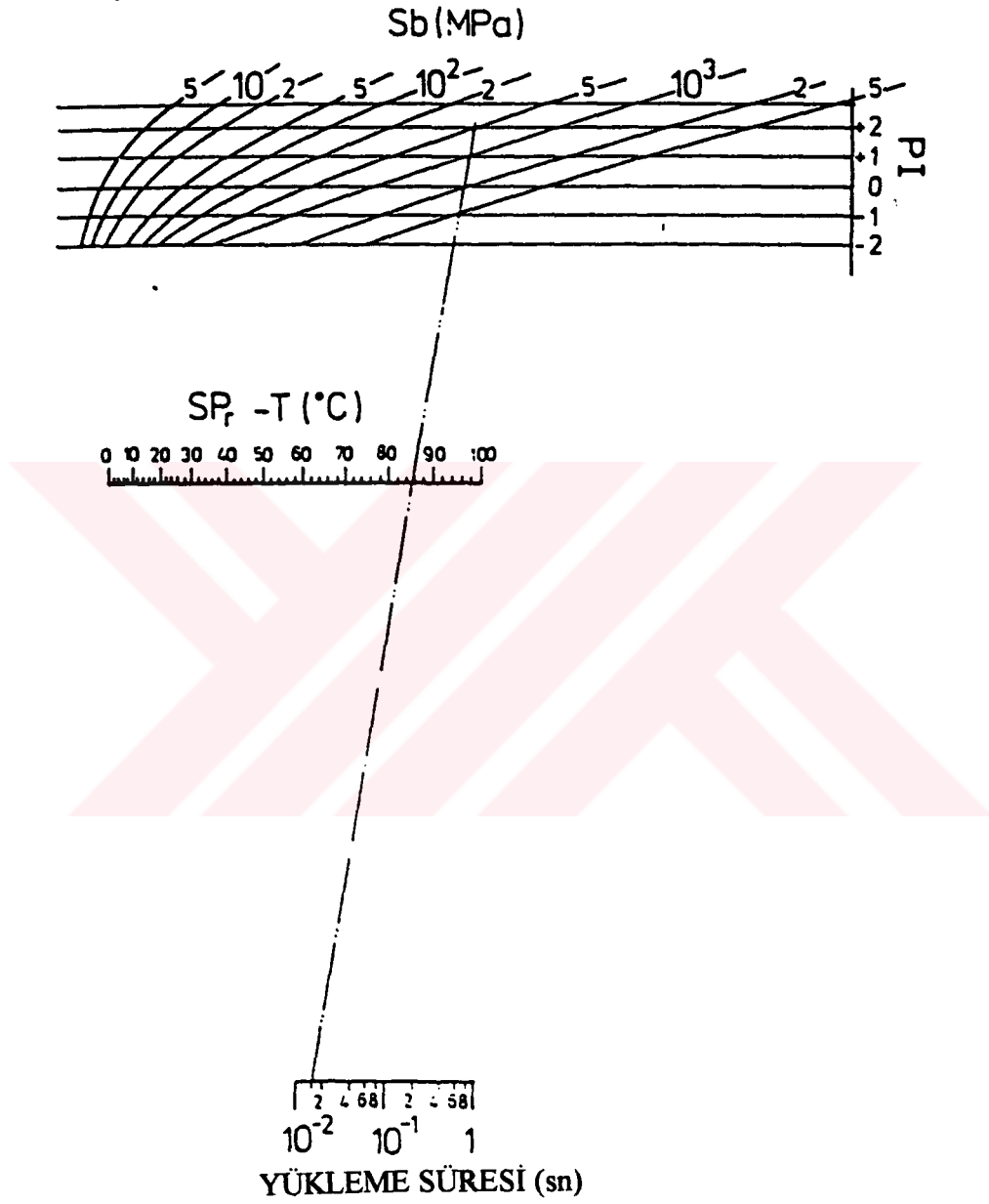
Bu formülde;

- S_b : Bitümün rijitliği
 SP_r : Geri kazanılmış bitümün yumuşama noktası (°C)
 PI_r : Geri kazanılmış bitümün penetrasyon indisi (dmm)
 T : Sıcaklık (°C)
 t : Yükleme süresi (sn)

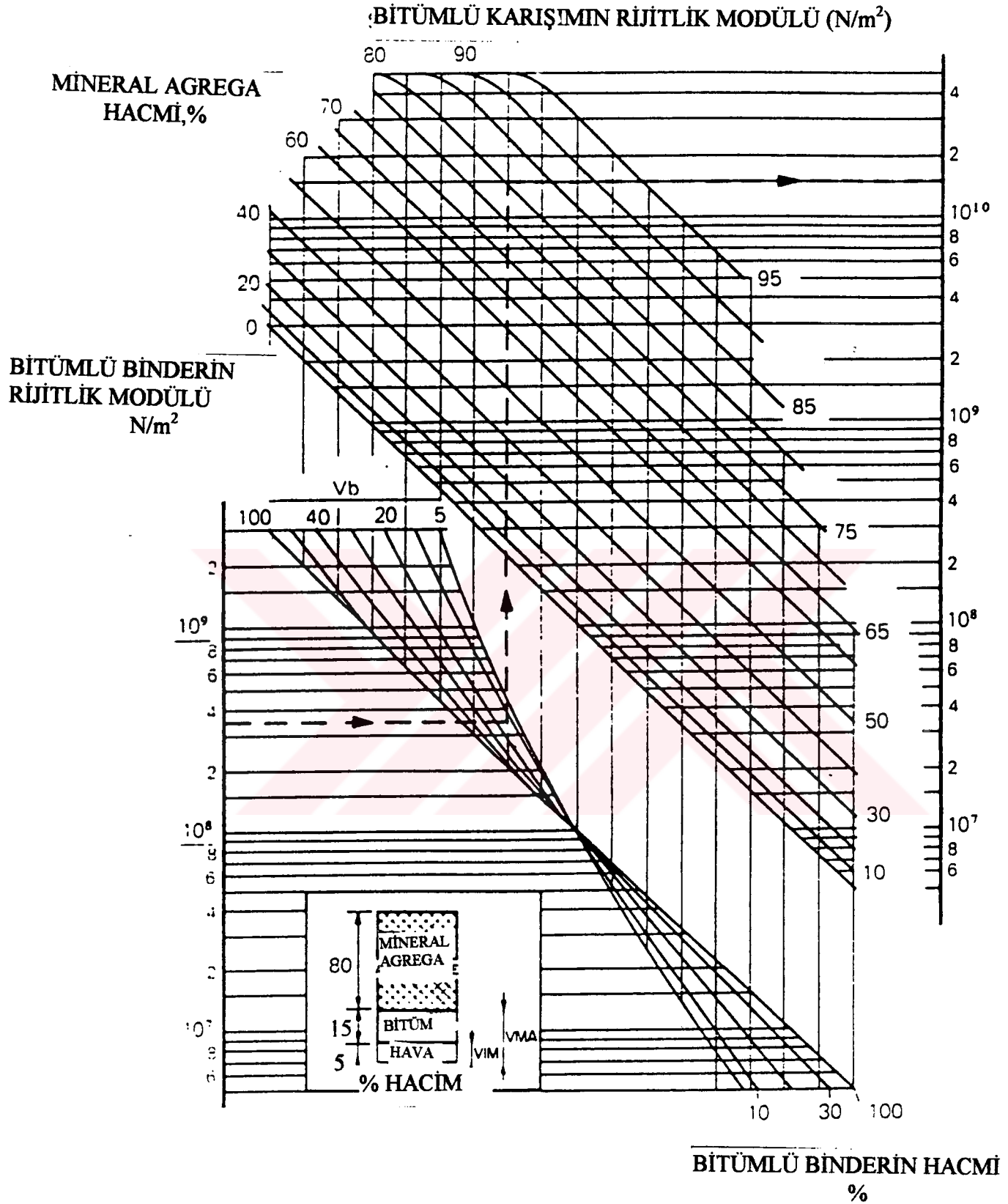
Günümüzde deneysel çalışmaların sonuçları verilen bitüm rijitliği, agrega ve bitümün % hacimleri için karışımın rijitliğinin bulunmasında kullanılacak bir nomograf halinde *Şekil 3.9*'da sunulmuştur.

Asfalt karışımının yüksek sıcaklıklardaki ve / veya uzun yükleme sürelerindeki düşük rijitlik modülü değerleri ($< 10^8 \text{ N / m}^2$) yukarıda sözü edilen parametrelere olduğu kadar agreganın özelliklerine ve derecelenmesine de bağlıdır.

Bu koşullara altında rijitlik modülü statik veya dinamik sabit yüklü tek eksenli basınç deneyleriyle belirlenir. Asfalt deformasyonu bu deneylerle verilen sıcaklıklarda eklenik yükleme süresinin bir fonksiyonu olarak ölçülebilir. Asfalt modülü yüksek rijitlik değerlerindeki dinamik testlerle sıcaklığa, bitümün tipine ve yükleme süresine bağlı olan bitümün rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak bulunabilir. Bu bağıntı karışımın kompozisyonuna ve kullanılan agreganın tipine bağlıdır.



ŞEKİL 3.8. Bitümün rijitliğini belirlemede kullanılan Van der Poel Nomografi



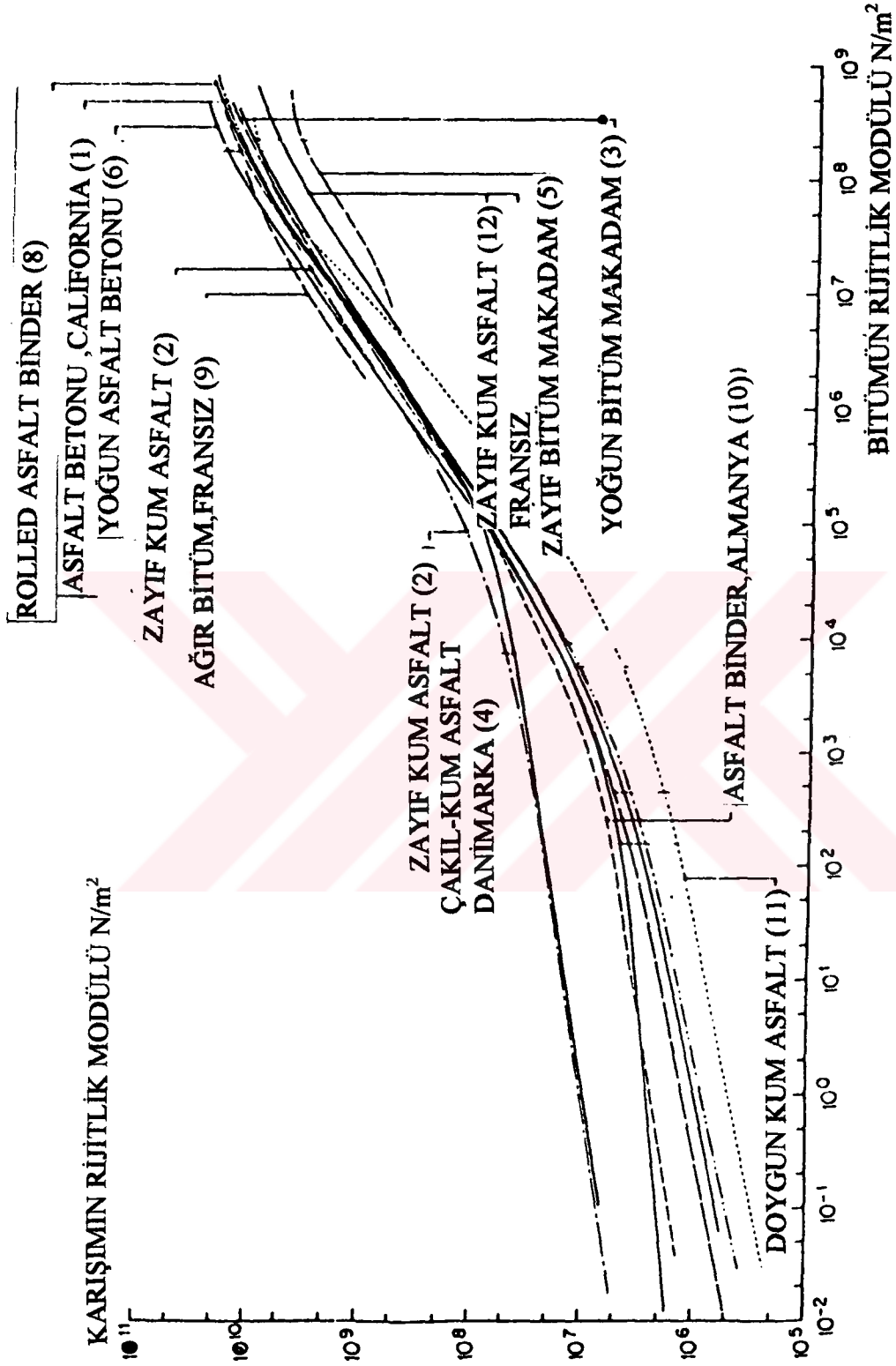
ŞEKİL 3.9. Bitümlü karışımların rijitliğini bulmak için kullanılan nomograf

Çeşitli ülkelerde kullanılan bazı asfalt karışımları için karışımın ve bitümün rijitlik değerleri arasındaki ilişki *Şekil 3.10*'da verilmiştir(CALESSEN ve diğ.1977). Bu eğriler laboratuvar ölçümlerinin sonuçlarına göre çizilmiştir. Karışımlarla ilgili ayrıntılı bilgi *Tablo 3.1*'de görülmektedir. Bazı karışımların çok benzer davranışlar sergilemesi sebebiyle, kolaylık olması açısından, eğri sayısı 4'e düşürülmüştür (*Şekil 3.11*). Bu eğrilerden bitümün, ilgili sıcaklık ve yükleme süresi için Van der Poel nomografından elde edilen, rijitlik modülüne bağlı olarak asfalt modülü bulunabilir. Bitümün rijitliğini belirlemek için penetrasyon indisi (PI) ve yumuşama noktası ya da penetrasyon 800'deki sıcaklık ($T_{800_{pm}}$) bilinmelidir. Tasarımda yükleme süresi olarak 0.02 sn alınırsa sonuçta çeşitli asfalt karışımlarının rijitlik modülleri sıcaklık ile verilen bitüm tipinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (*Şekil 3.12, Şekil 13*).

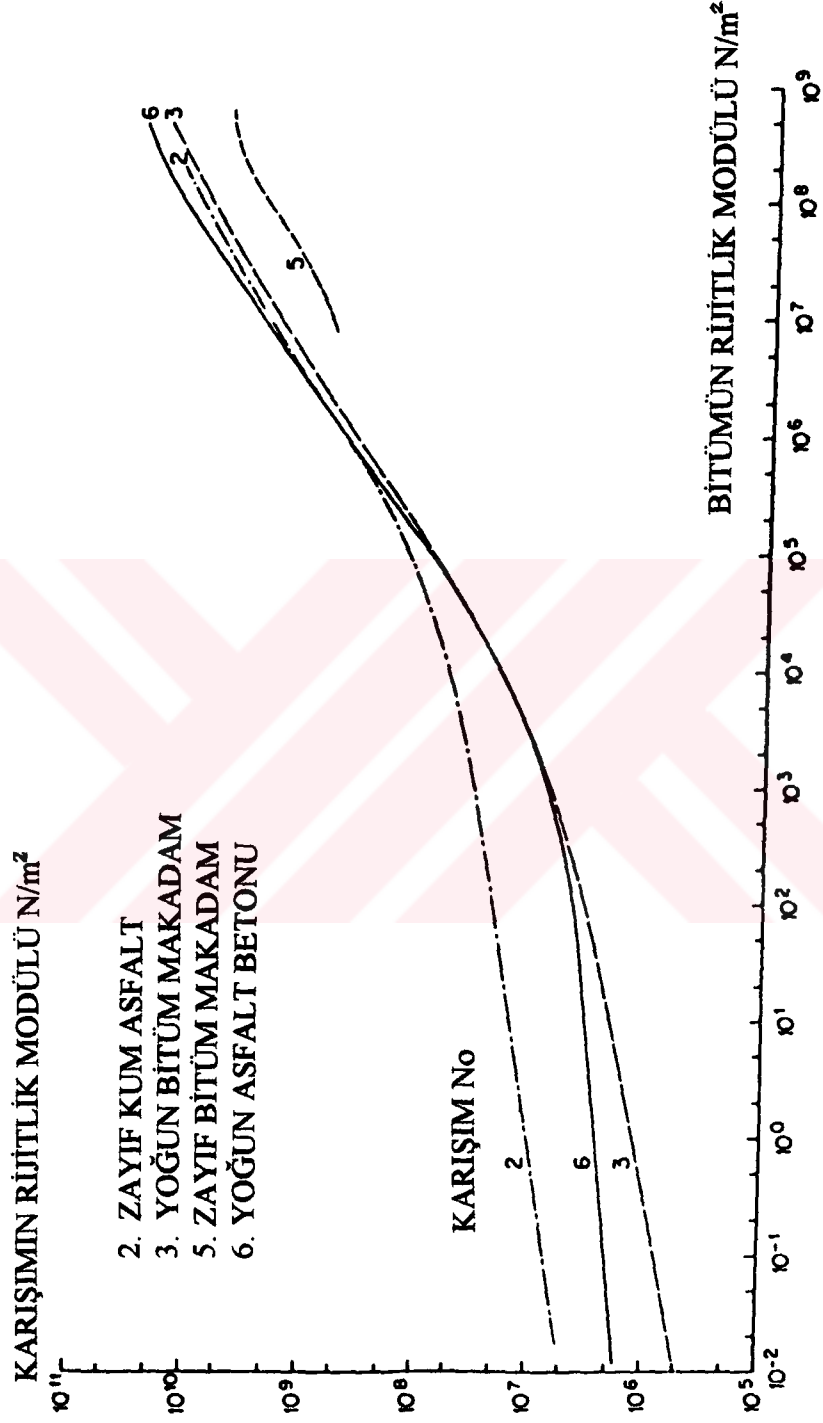
İlk tasarım çizelgeleri (1963) hazırlanırken hesaplamalarda sırasıyla zemin deformasyonu ve asfalt deformasyonu ile ilgili iki tane efektif asfalt modülü kullanılmıştır. Daha sonraları değişik iklimlerden kaynaklanan sıcaklık farklılıklarını karşılaması için Edwards ve Valkering tarafından bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin temel prensipleri aşağıdaki şekildedir(CALESSEN ve diğ.1977).

Kaynaklardan asfalt tabakasının çeşitli derinliklerindeki asfalt sıcaklıkları ile ortalama aylık hava sıcaklığı (MMAT) arasındaki ilişki bulunur. MMAT'nin çeşitli değerleri için bu şekilde elde edilen sıcaklık gradyanlarından bazı tipik üstyapıların çeşitli derinliklerdeki asfalt modülleri bulunur ve her bir sıcaklık gradyanı için asfalt deformasyonları hesaplanır. Daha sonra farklı sıcaklık gradyanları için bulunan deformasyon değerleri dizisiyle aynı toplam tahribatı yapan efektif deformasyon değerleri bulunur. Efektif deformasyon (ϵ_{eff}) "n" değişik sıcaklık gradyanı için aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

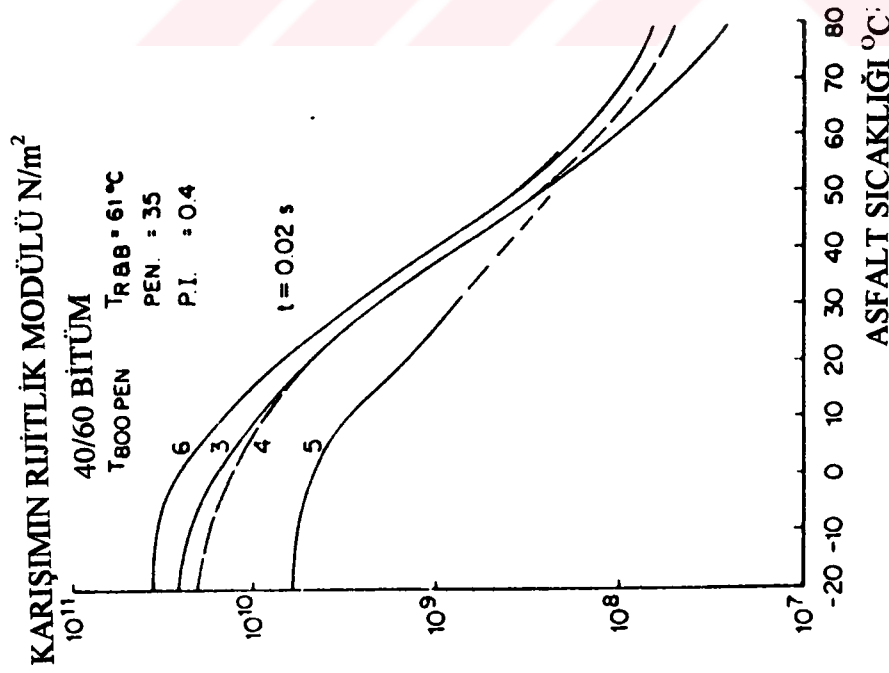
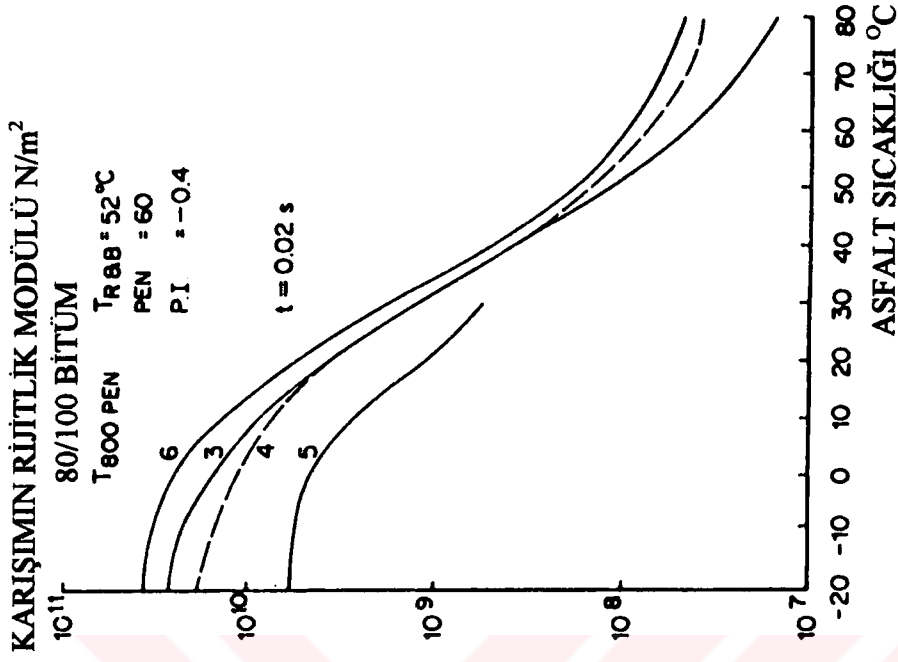
$$(\epsilon_{eff})^4 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^4 \quad (3.10)$$



Şekil 3.10. Bitümün rijitlik modülünün bir fonksiyonu olarak farklı asfalt karışımların rijitlik modülleri



Şekil 3.11. Bitümün rijitlik modülünün bir fonksiyonu temsili asfalt karışımların rijitlik modülleri



Şekil 3.12. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımlarının rijitlik modülleri (80/100 pen bitümlü karışımlar) Karışım numaraları Tablo 3.1'dekileri gösterir

Şekil 3.13. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak temsili asfalt karışımlarının rijitlik modülleri (40/60 pen bitümlü karışımlar) Karışım numaraları Tablo 3.1'dekileri gösterir

İzin verilen asfalt deformasyonu üzerindeki sıcaklık etkisini hesaba katmak için asfalt deformasyonu kriterine dayanan kalınlık tasarımına sıcaklığın etkisini gösteren bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemin özeti aşağıda verilmiştir.

Aynı sıcaklık gradyanlarıyla asfalt tabakasının çeşitli derinliklerindeki asfalt modülleri belirlenir. BISAR programı kullanılarak bu gradyanlar için asfalt tabakasının en altındaki ile tabaka kalınlığının 1/2 ve 2/3'ü seviyelerindeki asfalt deformasyonları hesaplanır. Her gradyan ve derinlik için ilgili karışımın yorulma verileri kullanılarak geçerli deformasyon ve modüle bağlı tasarım ömrü (N_i) bulunur. Daha sonra her bir derinlik için efektif tasarım ömrü “n” gradyan serisi için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$N_{eff} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{N_i} \right)} \quad (3.11)$$

Prensip olarak herhangi bir yapının efektif tasarım ömrü, verilen ortalama hava sıcaklığı (gradyanlar) ve karışım tipleri için bu şekilde hesaplanabilir. Bununla birlikte ince asfalt tabakaları ($h_1 \cong 100 \text{ mm}$) ve düşük sıcaklıklar ($< 10 \text{ }^\circ\text{C}$) dışında sıcaklık gradyanları için hesaplanan tasarım ömrünü veren efektif modül (toplam asfalt tabakası için) ve bu modülle oluşan asfalt deformasyonu kombinasyonu yok gibidir. Bununla birlikte efektif asfalt modülüyle zemin deformasyonuna bağlı eşdeğer hasara dayanan, önceki yöntemle hesaplanan efektif tasarım ömrü çeşitli gradyanlar için hesaplanan efektif tasarım ömründen her zaman “2” faktörü kadar büyüktür. Bu da 200 mm ve üzerindeki asfalt kalınlıklarıyla $10 \text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıklarda asfalt deformasyonu kriteri için tasarım eğrilerini elde etmek amacıyla tasarım ömrünün 1 ile 2 arasında bir faktörle düzeltilerek aynı efektif modülün kullanılabileceği anlamına gelir(CALESSEN ve diğ. 1977).

Bu yöntemle çeşitli karışımlar için MMAT, asfalt tabakası kalınlığı ve efektif asfalt modülü arasındaki bağıntı bulunur. Bu bağıntının tipik bir örneği Şekil 3.14’de görülebilir. Bu eğrilerin çeşitli karışım tipleri için üretilmesi durumunda efektif modüle denk düşen efektif asfalt sıcaklığı (MMAT) ve asfalt kalınlığı arasında ortalama bir bağıntı görülebilir (Şekil 3.15) (CALESSEN ve diğ. 1977).

İzin verilen asfalt deformasyonu üzerindeki sıcaklık etkisini hesaba katmak için asfalt deformasyonu ölçütüne dayanan kalınlık tasarımına sıcaklığın etkisini gösteren bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemin özeti aşağıda verilmiştir.

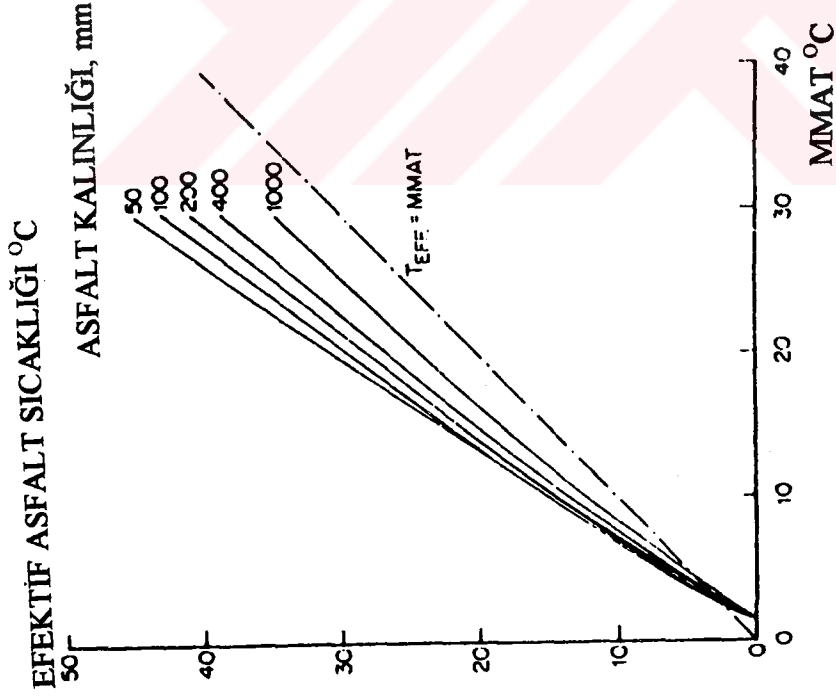
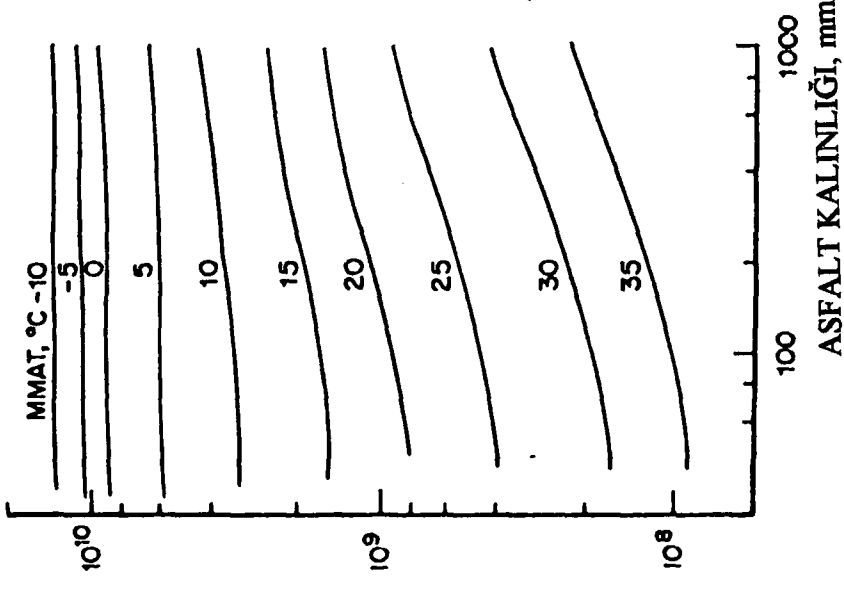
Aynı sıcaklık gradyanlarıyla asfalt tabakasının çeşitli derinliklerindeki asfalt modülleri belirlenir. BISAR programı kullanılarak bu gradyanlar için asfalt tabakasının en altındaki ile tabaka kalınlığının 1/2 ve 2/3'ü seviyelerindeki asfalt deformasyonları hesaplanır. Her gradyan ve derinlik için ilgili karışımın yorulma verileri kullanılarak geçerli deformasyon ve modüle bağlı tasarım ömrü (N_i) bulunur. Daha sonra her bir derinlik için efektif tasarım ömrü “n” gradyan serisi için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$N_{eff} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{N_i} \right)} \quad (3.11)$$

Prensip olarak herhangi bir yapının efektif tasarım ömrü verilen ortalama hava sıcaklığı (gradyanlar) ve karışım tipleri için bu şekilde hesaplanabilir. Bununla birlikte ince asfalt tabakaları ($h_1 \cong 100 \text{ mm}$) ve düşük sıcaklıklar ($< 10 \text{ }^\circ\text{C}$) dışında sıcaklık gradyanları için hesaplanan tasarım ömrünü veren efektif modül (toplam asfalt tabakası için) ve bu modülle oluşan asfalt deformasyonu kombinasyonu yok gibidir. Bununla birlikte efektif asfalt modülüyle zemin deformasyonuna bağlı eşdeğer hasara dayanan, önceki yöntemle hesaplanan efektif tasarım ömrü çeşitli gradyanlar için hesaplanan efektif tasarım ömründen her zaman “2” faktörü kadar büyüktür. Bu da 200 mm ve üzerindeki asfalt kalınlıklarıyla $10 \text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıklarda asfalt deformasyonu ölçütü için tasarım eğrilerini elde etmek amacıyla tasarım ömrünün 1 ile 2 arasında bir faktörle düzeltilerek aynı efektif modülün kullanılabileceği anlamına gelir(CALESSEN ve diğ.1977).

Bu yöntemle çeşitli karışımlar için MMAT, asfalt tabakası kalınlığı ve efektif asfalt modülü arasındaki bağıntı bulunur. Bu bağıntının tipik bir örneği Şekil 3.14’de görülebilir. Bu eğrilerin çeşitli karışım tipleri için üretilmesi durumunda efektif modüle denk düşen efektif asfalt sıcaklığı (MMAT) ve asfalt kalınlığı arasında ortalama bir bağıntı görülebilir (Şekil 3.15) (CALESSEN ve diğ.1977).

KARİŞIMIN EFEKTİF RİJİTLİK MODÜLÜ N/m^2

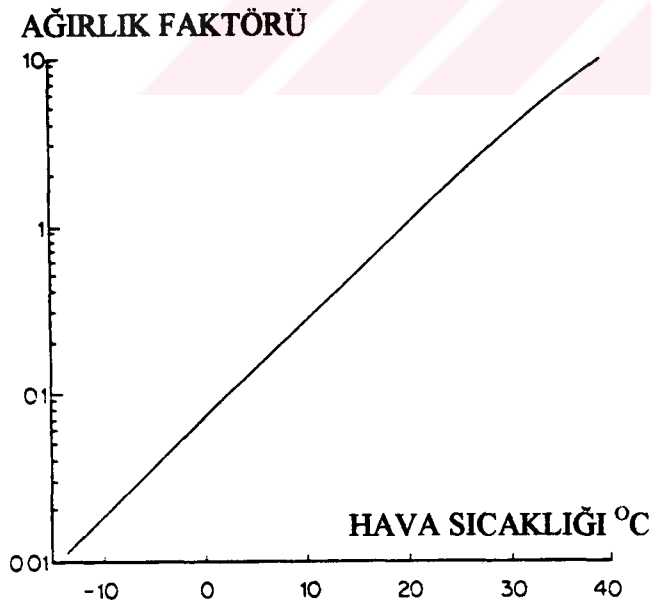


Şekil 3.14. MMAT ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak asfalt karışımın rijitlik modülü (80/100 pen bitümlü yoğun bitümlü makadam)

Şekil 3.15. MMAT ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak efektif asfalt sıcaklığı

Yukarıda açıklanan yöntem farklı iklimlere sahip çeşitli bölgelerdeki (*Tablo 3.2*) üstyapıların (*Tablo 3.3*) efektif asfalt modüllerini bulmakta kullanılmaktadır. Her bir bölge ve yapı için 12 deformasyon değerinden oluşan seriyle eşdeğer hasarı verecek efektif zemin veya asfalt deformasyonunu elde etmek için kullanılacak hava sıcaklığı yukarıdaki yöntemle benzer bir yolla bulunabilir. Her bir bölge ve yapı için bulunan sıcaklıklar (aslında ortalama yıllık hava sıcaklığı, MAAT) yapılar arasında ufak farklılıklar gösterebilir, ortalama MAAT aritmetik ortalama değeri hesaplanarak bulunur (CALESSEN ve diğ.1977).

Bu yöntemi her bölge için uygulamak zor olacağından verilen MMAT değerinden MAAT değerini elde etmek için bir yol geliştirilmiştir. Her MMAT değeri için, ağırlık faktörünü sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gösteren *Şekil 3.16*'dan bir ağırlık faktörü bulunur ve bu faktörlerin aritmetik ortalaması alınarak efektif MAAT değeri elde edilir. Bu eğri *Tablo 3.2*'deki bölgelerin MAAT'lerine söz konusu yöntemin uygulanmasıyla çizilmiştir. Sonuçta bulunan MAAT değerleri efektif deformasyon değerleri kullanılarak bulunan değerlere olabildiğince yakın olacaktır(CALESSEN ve diğ.1977).



ŞEKİL 3.16. Ağırlıklı sıcaklık bulma eğrisi

Tablo 3.2 Çeşitli bölgeler için sıcaklık verileri

	Ortalama Aylık Hava Sıcaklıkları, °C												Ortalama Yıllık Hava Sıcaklıkları, °C	
	O c a k	Ş u b a t	M a r t	N i s a n	M a y ı s	H a z ı r a n	T e m m u z	A ğ u s t o s	E y l ü l	E k i m	K a s ı m	A r a l ı k	Ortalama Efektif	Ağırlıklı
Anchorage	-11	-8	5	-2	7	12	14	13	9	2	-6	-11	7.7	5.4
Bahrain	17	18	21	25	29	32	33	33	32	28	24	18	26.5	27.5
Bangkok	26	17	29	30	29	29	29	29	28	27	26	25	27.5	27.8
Beirut	13	14	15	18	22	24	27	27	26	24	19	16	21.8	22.0
Chicago	-4	-3	2	8	14	19	23	22	18	12	4	-1	15.0	14.5
Frankfurt	1	2	6	10	14	17	18	18	15	10	4	2	12.6	12.2
Houston	12	13	17	21	24	27	28	28	26	22	16	16	22.5	22.7
Kuala Lumpur	27	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27	27	27.0	27.3
Lagos	27	28	28	28	27	26	26	25	26	27	27	27	26.6	27.0
London	4	4	7	9	12	16	18	17	15	11	7	4	12.3	12.0
Madrid	4	6	9	12	16	21	23	23	19	14	8	6	16.5	16.3
Melbourne	19	19	18	15	12	10	9	11	12	14	16	18	15.6	15.3
Nairobi	18	19	19	19	18	16	16	16	20	18	18	18	17.8	18.0
New Delhi	14	17	22	28	33	33	31	30	29	29	20	18	26.6	27.5
New York	-1	-1	3	10	16	17	23	23	21	15	9	2	15.9	15.7
Rome	8	8	11	14	18	22	24	24	22	18	12	6	18.1	18.0
Tokyo	3	4	7	12	17	21	24	26	22	17	11	6	18.1	17.7

Tablo 3.3 Tipik kaplama yapıları

Yapı No	h_1 , mm	h_2 , mm	E_3 , MPa
I	175	625	30
II	350	0	30
III	100	0	30
IV	300	250	30
V	500	150	100
VI	275	0	200
VII	75	125	200
VIII	75	0	200
IX	50	250	30
X	150	200	200

3.2.2.3.5 Poisson Oranı

Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı malzemeler için bir dizi Poisson Oranı (ν) değeri verilmiştir. Çok ince ve dikkatli ölçümler gerektirmesi nedeniyle Poisson Oranı'nın doğru olarak belirlenmesi oldukça zordur. Dahası Poisson Oranı gerilme, sıcaklık, vb. faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bununla birlikte Poisson Oranı'ndaki değişimlerin birincil tasarım parametreleri (maksimum zemin basınç deformasyonu,

maksimum asfalt çekme deformasyonu) üzerindeki etkisi azdır. Kısa süreli yüklemeler için asfaltın Poisson Oranı $\nu = 0.35$ dolaylarında bulunmuştur. Bağlayıcısız temel malzemeleri ve zemin için de aynı değer alınabilir. Çimentolu temeller için $\nu = 0.25$ değeri kullanılır (CALESSEN ve diğ.1977).

3.2.3 Tasarım Ölçütleri

Zemin deformasyonlarının verilen zemin ve asfalt modüllerinde izin verilen değerleri aşmaması için gerekli asfalt ve bağlayıcısız temel tabakası kalınlıkları; verilen yük uygulama miktarına denk düşen izin verilen zemin deformasyonlarının temel grafikte yerine konmasıyla bulunur. Çimentolu temeller için izin verilen gerilme değerleri de aynı yolla bulunabilir.

Asfalt deformasyonu ölçütleri için izin verilen asfalt deformasyonu değeri asfalt modülüne ve efektif asfalt modülü kullanılması sebebiyle asfalt tabakasının kalınlığına bağlı olduğundan deneme yanılmaya dayalı bir yöntem kullanılmalıdır. Ayrıca tasarım ömrüne enine tekerlek yükü dağılımı ($N_{eff} = 0.4 \cdot N$), aralıklı yükleme ($N_{eff} \cong 0.1 \cdot N - 0.8 \cdot N$, sırasıyla yoğun ve zayıf karışımlar) ve sıcaklık gradyanı ($N_{eff} = N - 2 \cdot N$, İnce tabaka ve/veya düşük sıcaklıklar - kalın tabaka ve yüksek sıcaklıklar) etkileri için düzeltme faktörleri uygulanır. Bağlayıcısız temeldeki malzemelerin CBR değerleriyle ifade edilen minimum kalite düzeyleri bulunacak modüle bağlı tanımlanmıştır ve zemin modülüyle bağlayıcısız temel tabakasının kalınlığına bağlıdır.

3.2.4 Temel Hesaplamalar

BISAR programı kullanılarak değişik zemin ve asfalt tabakası modülleri ile bağlayıcısız temel ve asfalt tabakası kalınlıkları için çok sayıda yapının standart çift tekerlek yükü altındaki zemin basınç ve asfalt yatay çekme deformasyonları hesaplanmıştır. Bağlayıcısız temelin modülü temelin kalınlığıyla ve zemin modülüyle orantılı olarak değişir. Deformasyon değerleri tekerleklerden birinin merkezinin altında ve tekerlekler arasındaki simetri eksenini üzerinde; asfalt deformasyonu da hem trafik yönünde hem de trafik yönünün sağ açısında hesaplanır.

asfalt deformasyonu hesaplanır. Her seviye için en büyük değer o seviyenin deformasyonu olarak alınır(CALESSEN ve diğ.1977).

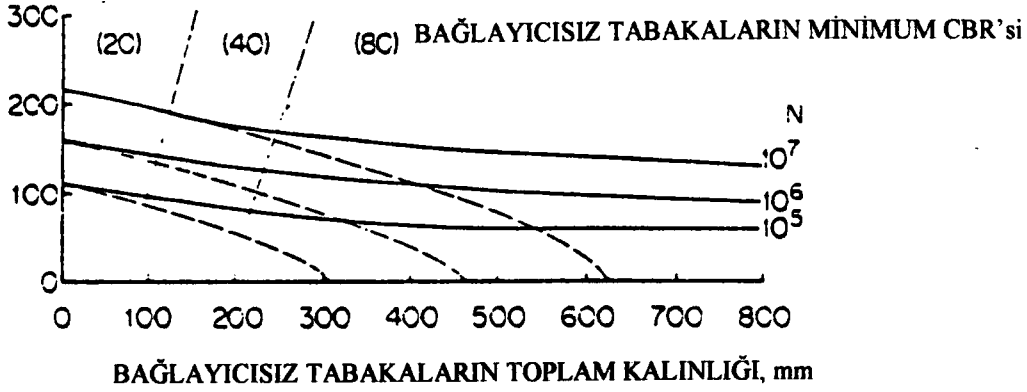
3.2.5 Tipik Tasarım Eğrileri

Shell tasarım çizelgelerinin ilk hali (1963) gerekli asfalt kalınlığını verilen zemin modülü ve bağlayıcısız temel tabakası kalınlığının bir fonksiyonu olarak veren eğrileriyle mühendisler tarafından uygulamada kullanmak açısından uygun bulunmaktadır. Yeni sistemde hava sıcaklığı ve karışım tipiyle ilgili yeni parametreler de göz önünde bulundurularak çizelge sayısı arttırılmıştır (CALESSEN ve diğ.1977). Verilen zemin modülü, karışım tipi ve ortalama hava sıcaklığı için tipik bir tasarımın aşamaları aşağıdaki gibidir.

Belirtilen karışım tipi için efektif asfalt modülü; *Şekil 3.15*'te gösterilen ortalama hava sıcaklığı ile efektif asfalt sıcaklığı arasındaki bağıntı ve *Şekil 3.12* ile *Şekil 3.13*'teki asfalt modülüyle asfalt sıcaklığı arasındaki ilişki kullanılarak *Şekil 3.14*'tekine benzer bir şekilde ortalama hava sıcaklığı ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak bulunur. Daha sonra verilen asfalt sıcaklığı için bağlayıcısız temel tabakasının, zemin basınç deformasyonunu sınırlandırmak için, gerekli kalınlığı yük uygulama sayısı ve zemin modülüyle BISAR programı kullanılarak bulunur. Bu işlem verilen ortalama hava sıcaklıkları ve uygulanan yük miktarı için zemin deformasyonu ölçütlerine dayalı tasarım eğrileri oluşturmak amacıyla asfalt kalınlığının çeşitli değerleriyle tekrarlanır. Aynı ortalama hava sıcaklıkları ile yük miktarı kullanılarak ve efektif modülün belirlendiği asfalt kalınlığı alınarak asfalt deformasyonu ölçütlerine dayalı tasarım eğrisi çizilir. Ardından *Şekil 3.4*'ten izin verilen asfalt deformasyonu ve temel grafikten gerekli bağlayıcısız malzeme kalınlığı bulunur. İşlem diğer asfalt kalınlıkları için tekrarlanır. Son olarak "Tasarım Ölçütleri" bölümünde anlatıldığı şekilde enine tekerlek yükü dağılımı vb. için tasarım eğrisinde düzeltmeler yapılır (CALESSEN ve diğ.1977).Diğer hava sıcaklıkları ve karışım tipleri için benzer şekilde tasarım eğrileri çizilebilir. Bununla ilgili örnekler *Şekil 3.17*, *Şekil 3.18* ve *Şekil 3.19*'da görülebilir.

YOĞUN BİTÜM MAKADAM (80/100)
AĞIRLIKLI MAAT = 12 °C
ZEMİN MODÜLÜ = $5 \cdot 10^7$ N/m²

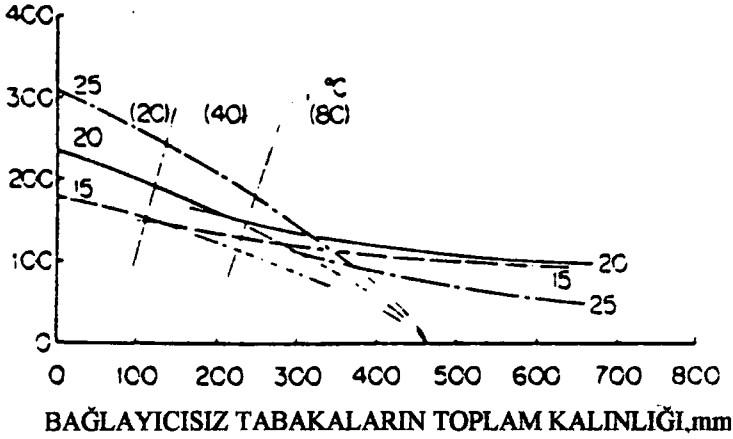
TOPLAM ASFALT KALINLIĞI , mm



ŞEKİL 3.17. Tipik tasarım eğrileri (Değişken N)

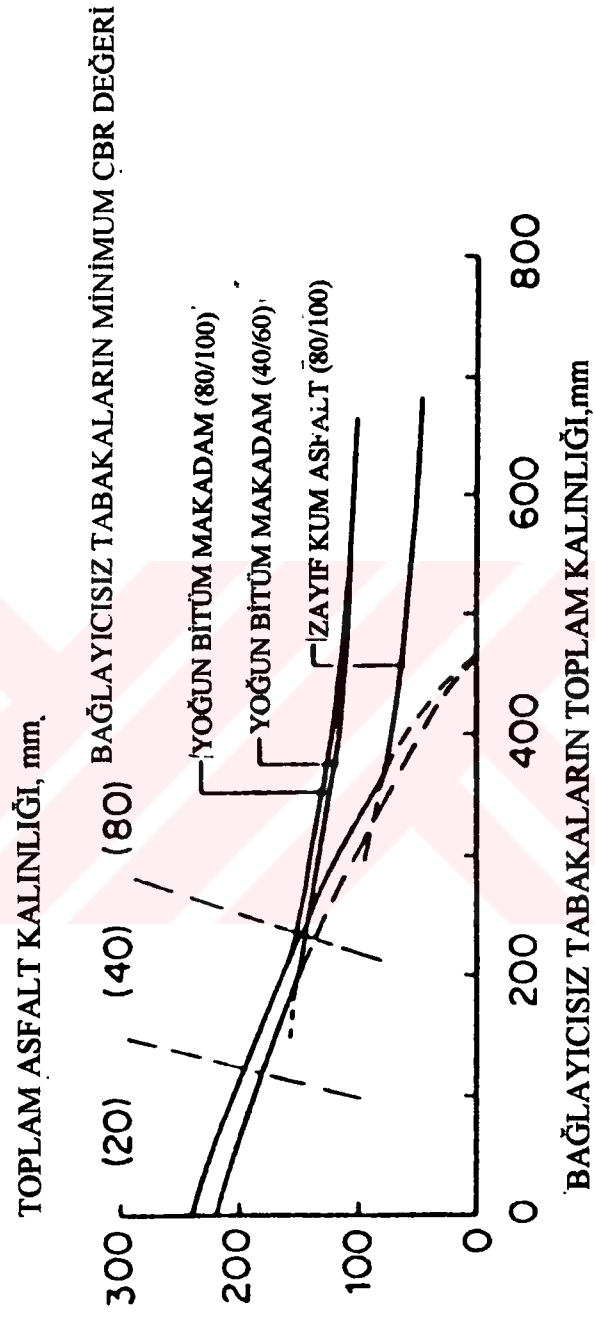
KARIŞIM TİPİ: YOĞUN BİTÜM MAKADAM (80/100)
ZEMİN MODÜLÜ $5 \cdot 10^7$
STANDART DİNGİL YÜKÜ SAYISI N=10⁶

TOPLAM ASFALT KALINLIĞI, mm



ŞEKİL 3.18. Tipik tasarım eğrileri (Değişken ağırlıklı yıllık ortalama hava sıcaklığı, MAAT)

ZEMİN MODÜLÜ = $5 \cdot 10^7$ N/m²
 STANDART DİNGİL YÜKU SAYISI $N=10^6$
 AĞIRLIKLI MAAT = 20 °C



Şekil 3.19. Farklı karışım tipleri için tipik tasarım eğrileri

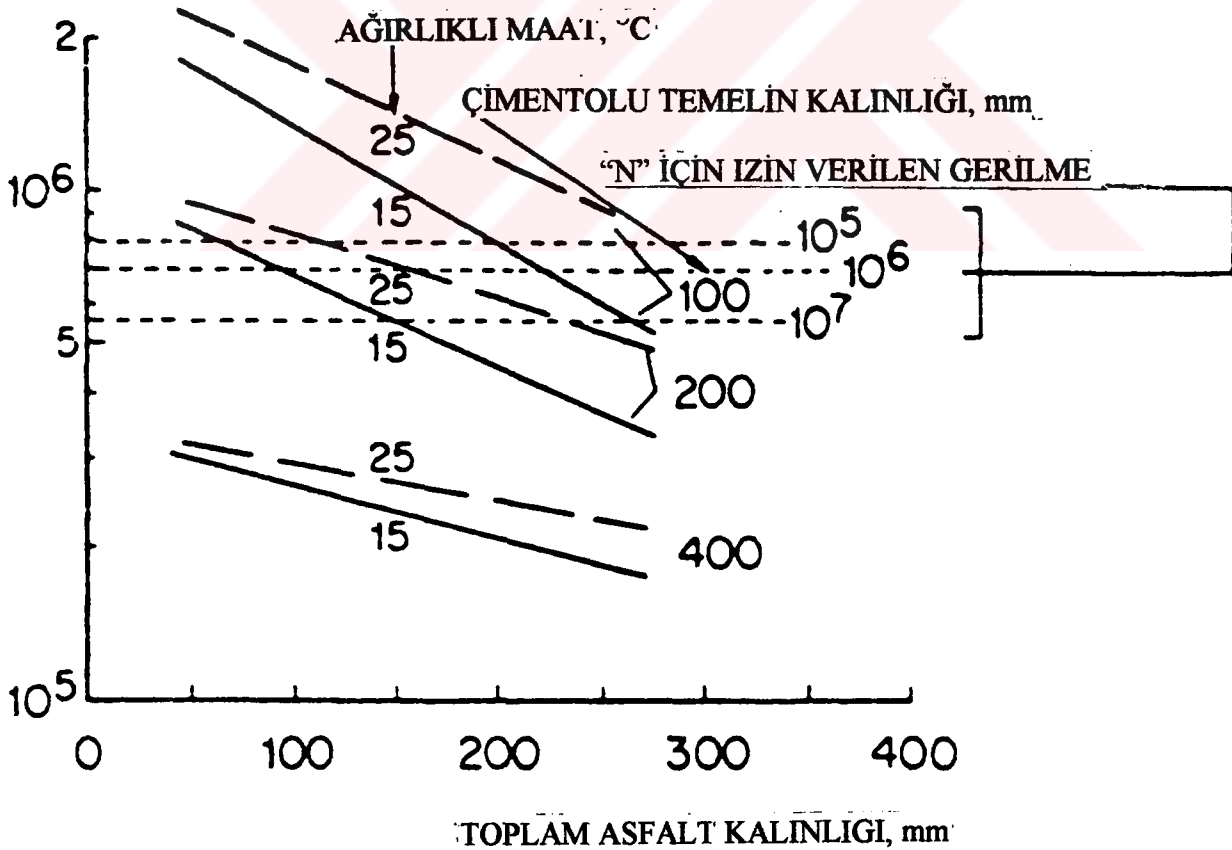
İzin verilen gerilme değeri belirtilerek, çimentolu temel tabakaları için de benzer yöntemle tasarım eğrisi çizilebilir. Çimentolu temel tabakaları için, genellikle, standartlaştırılmış kalınlıklar kullanılır ve verilen zemin modülü, temel modülü, ortalama hava sıcaklığı ve tasarım ömrü için gerekli asfalt kalınlığı belirlenir. Bu kritere göre bir hesaplama modeli kullanarak gerekli minimum asfalt kalınlığının belirlenmesi oldukça zordur ve bu nedenle tecrübeye dayalı bir seçim yapılır. Genelde 150 mm - 250 mm minimum asfalt kalınlığı önerilir. Şekil 3.20’de bir örnek verilmiştir.

KARIŞIM TİPİ: YOĞUN BİTÜM MAKADAM (80/100)

ZEMİN MODÜLÜ $E_3 = 5 \cdot 10^7$

ÇİMENTOLU TEMELİN MODÜLÜ $E_2 = 10^{10}$ N/m²

ÇİMENTOLU TEMELDEKİ ÇEKME GERİLMESİ, N/m².



ŞEKİL 3.20. Çimentolu temel tabakasına sahip üstyapıların kalınlık tasarımı

3.2.6. PC Versiyonu

Tasarım yönteminin bilgisayar versiyonu bir takım farklı fakat birbirini takip eden adımlardan oluşur. Bunların her birinin yöntem içinde ayrı ve iyi tanımlanmış bir işlevi vardır. Programın yapısı aşağıdaki şekilde açıklanabilir (MIHT,1997).

1. İklimin asfalt tabakasının sıcaklığına etkisinin belirlenmesi,
2. Üstyapı tasarım ömrünün trafik yükü kullanılarak belirlenmesi,
3. Temel ve zemin özelliklerinin belirlenmesi,
4. Bitümün rijitliğinin belirlenmesi,
5. Asfalt karışımının rijitliğinin belirlenmesi,
6. Üstyapı modelinin tanımlanması,
7. Hesaplamaların başlangıcı için asfalt tabakası kalınlığının belirlenmesi,
8. Gerilmelerin hesaplanması için BISAR modülü,
9. Üstyapı gerilmelerinin üstyapı ömrüne dönüştürülmesi,
10. İstenen tasarım ömrü için kaplama yapısının belirlenmesine yönelik deneme yanılmaya dayalı BISAR hesaplamalarının yapılması.

3.2.6.1. İklimin Asfalt Karışımının Sıcaklığına Etkisi

Gösterilen ilk modül kullanıcıya yapının bulunduğu bölgeye ait iklim koşullarını temsil eden sıcaklık koşullarını seçme veya girme imkanı sağlar. Modül belirli bir bölge için ortalama aylık hava sıcaklığı verilerini kullanarak ağırlıklı yıllık ortalama hava sıcaklığını verir. “Ağırlıklı” kelimesiyle kastedilen kaplama sıcaklıklarındaki, aylık sıcaklıkların aritmetik ortalamasından anlaşılamayacak, günlük ve aylık değişimlerin tasarıma etkilerinin de hesaba katıldığıdır. Modül normalde sıcak, ılıman ve soğuk iklimleri temsil eden 21 bölgeye ait verileri içerir. Meteorolojik verilerin mevcut olması durumunda kullanıcı verilen bölge için özel verileri de girebilir (MIHT,1997).

3.2.6.2. Üstyapı Tasarım Ömrünün Trafik Yüğü Kullanılarak Belirlenmesi

Tasarımda kullanılan trafik yüklemesi üstyapının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı toplam eşdeğer standart dingil yüküyle temsil edilir; 80 kN'luk tek dingil standart tasarım yükünün iki çift 20 kN tekerlekten oluştuğu kabul edilir. Trafik verilerinin şerit başına günlük ticari dingil sayısı olarak bilinmesi gerekir. Bunlar daha sonra eşdeğer standart dingile çevrilecektir.

Bir yılda bu trafik düzeyinin gözlemlendiği gün sayısı ve tasarım ömrü boyunca tahmin edilen trafik artış oranı da bu orana dahildir. Alternatif olarak tasarım ömrü boyunca yapıya uygulanacağı tahmin edilen toplam standart dingil sayısını kapsayan eklenik trafik değeri de veri olarak girilebilir (MIHT,1997).

3.2.6.3. Temel ve Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Yol temeli ve kaplama yapısının sonraki performansı için çok büyük öneme sahiptir. Zemine iletilen gerilmeler, inşaat esnasında ve yolun hizmet ömrü boyunca tabakanın altındaki bölgede aşırı gerilmelerin oluşmasını engellemek amacıyla, en aza indirgenmelidir. Kısıtlamalarına rağmen (%) olarak ifade edilen California Taşıma Oranı (CBR) kaplama zeminlerinin sağlamlığının belirlenmesi konusunda kabul gören bir yöntemdir ve aşağıdaki eşitlik aracılığıyla resilient karakteristikleriyle ilişkilendirilir.

$$E_3 = 17.6 \cdot (CBR)^{0.64} \quad (3.12)$$

Bu eşitlikte;

E_3 : Zemin rijitliği

CBR : California Taşıma Oranı'dır.

CBR değeri laboratuvar deneyleriyle ölçülmeli ya da, ideal olarak, resilient özellikleri örneklerin test edilmesiyle elde edilmelidir. Bu verilerin mevcut olmaması durumunda zemin modülü *Şekil 3.21'*den bulunabilir.

Bağlayıcısız temel, inşaat süresince, bir yük yayma tabakasının ve taşıyıcı yolun görevlerini tatmin edici bir şekilde yerine getirmelidir. Malzeme özellikleri rijitlikle nitelendirilmiştir. Kaplama tasarımı için resilient modülünün tasarımda kabul edilen giriş değerlerini sağlaması gerekir. Alt temelin rijitliği malzemenin tipine, tabaka kalınlığına, sıkıştırmaya ve zeminin yeterliliğine bağlı olmakla birlikte aşağıdaki eşitlik kullanılarak yaklaşık olarak belirlenebilir (MIHT,1997).

$$E_2 = k \cdot E_3 \quad (3.13)$$

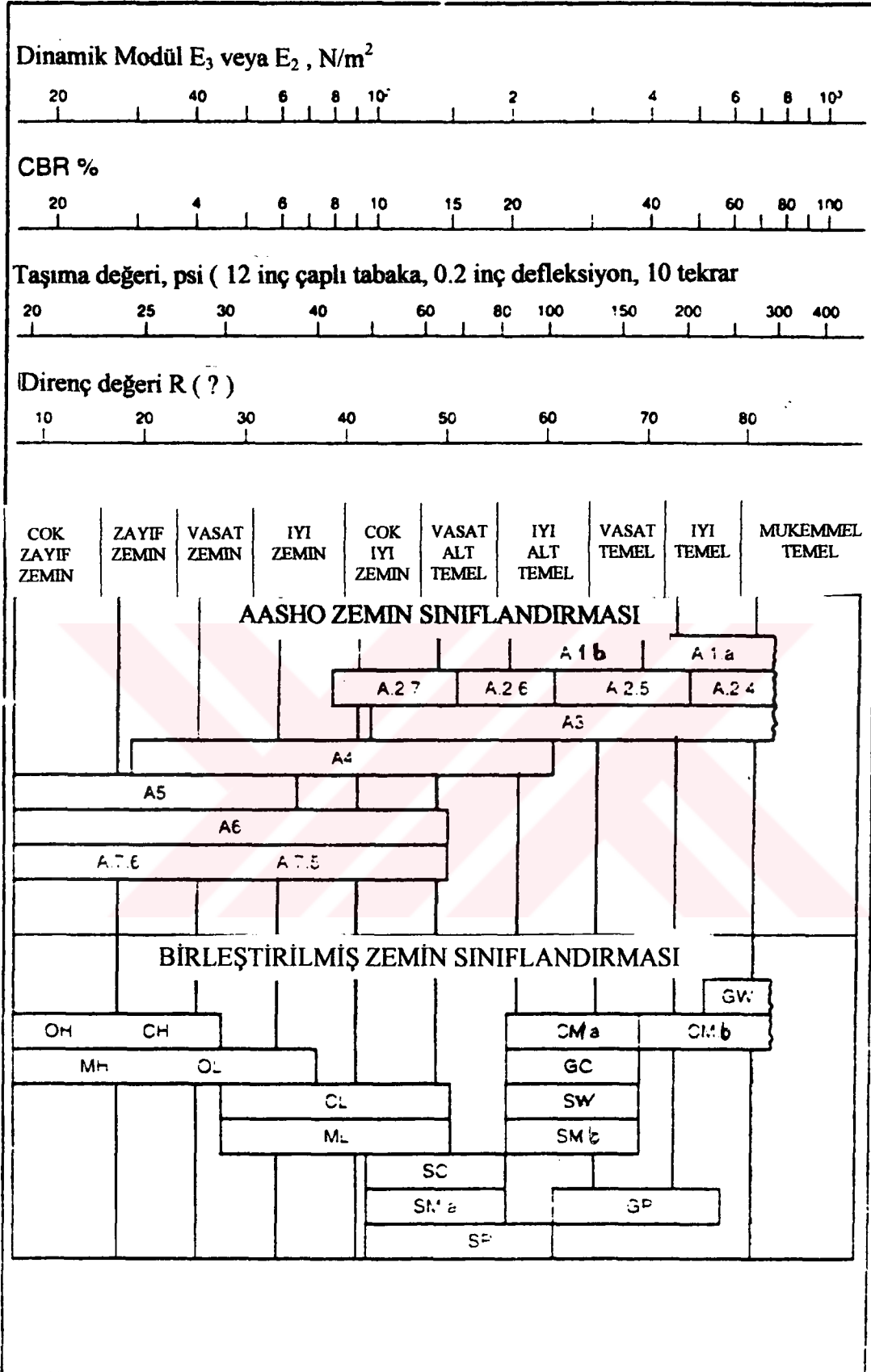
Bu formülde;

E_2 : Alt temelin rijitlik modülü

E_3 : Zeminin rijitlik modülü

k : $0.2 \cdot (h_2)^{0.45}$, (h_2 : Alt temelin kalınlığı, mm) (3.12a)

Granüler alt temelde tatmin edici bir rijitlik-kalınlık kombinasyonu sağlamak suretiyle zeminin üzerinde yüksek gerilmelerin oluşması önlenmiş ve böylece tamamlanmış üstyapının gerilme deformasyonu ölçütünü gerçeklemesi sağlanmış olur (MIHT,1997).



ŞEKİL 3.21. Taban zemininin veya bağılayıcısız temel malzemelerinin dinamik modülünün belirlenmesi

3.2.6.4. Bitümün Rijitliğinin Belirlenmesi

Asfalt tabakasının tasarımında bir sonraki adım hacim oranları ve yük yayma özellikleriyle nitelendirilen karışım kompozisyonunun belirlenmesidir. Asfalt tabakasının yükü yayma ve alt temele iletilen gerilmeleri azaltma yeteneği malzemenin servisteki rijitliğiyle ifade edilir. Bu parametre, malzemeler hakkında yeterli bilgi mevcutsa, doğrudan kullanılabilir veya karışım kompozisyonunun özelliklerinden tahmin edilebilir. Bitümün rijitliği asfalt tabakasında kullanılan bitüm ile ilgili aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyan Van der Poel nomografinin (Şekil 3.8) bilgisayara yüklenen haliyle bulunabilir (MIHT,1997).

- Geri kazanılmış bitümün yumuşama noktası (°C)
- Geri kazanılmış bitümün penetrasyon indisi (dmm)
- Yükleme süresi (Normalde hareketli trafiği temsilen $t = 0.02$ sn alınır)

Tahmine dayalı yöntem yalnızca S tipi penetrasyon sınıfı bitümler için geçerlidir, polimer modifiye bitümlerin belirgin şekilde değişen reolojilerine hitap etmez.

3.2.6.5. Asfalt Karışımının Rijitliğinin Belirlenmesi

Karışımın rijitliğinin belirlenmesi Bonnaure ve arkadaşlarının önerdiği, 12 standart asfalt karışımının değerlendirilmesiyle geliştirilen yöntemeye dayanır (Şekil 3.9).

Gerekli bilgiler aşağıdaki şekildedir:

- Bitümün rijitliği (S_{bit})
- Karışımdaki bitümün hacimce yüzdesi (V_{bit})
- Mineral agreganın hacimce yüzdesi (V_{agg})

3.2.6.6. Üstyapı Ömrünün ve Asfalt Tabakası Kalınlığının Belirlenmesi

SPDM-PC’de BISAR programı kullanılarak tasarlanan yapının kritik noktalarındaki, yukarıda sözü edilen, gerilmeler hesaplanır. Sonuçlar daha sonra bozulma ölçütlerini

veren eşitliklerde (tasarım güven derecesine bağı olarak 1-4 nolu eşitlikler) yerine konur ve bulunan üstyapı ömrü üstyapının gerçek ömrü ile karşılaştırılır. Eğer hesaplanan ömürle olması istenen ömür arasındaki fark %5'ten küçükse üstyapı kalınlığı tasarım kalınlığı olarak kabul edilir. Üstyapı ömrünün uzun veya kısa olması nedeni ile fark %5'ten büyükse asfalt tabakasının kalınlığı artırılıp azaltılarak gerilmeler hesaplanır ve karşılaştırma işlemi tekrarlanır. Bu deneme yanılmaya dayalı işlem karşılaştırmadan tatmin edici bir sonuç alınana kadar tekrarlanmakla birlikte genellikle dört veya beşinci deneme yanılmadan sonra arzu edilen sonuca ulaşılır.



BÖLÜM 4

ANALİTİK - AMPİRİK YÖNTEMLER

4.1 GİRİŞ

Yapılan araştırmalar sonucunda üstyapının performansında, analitik yöntemle modellenemeyen, bazı faktörlerin etkili olduğu görülmüştür. Bundan dolayı analitik yöntemlerin ampirik bağıntılarla ve performans gözlemleriyle kalibrasyonunun gerekliliği hissedilmiş, sonuçta analitik - ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerle gerçeğe daha yakın ve başarılı tasarımlar yapılabilmektedir.

4.2 AASHTO 93* YÖNTEMİ

Analitik-ampirik tasarım yöntemleri arasında yer alan AASHTO 93 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi, Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Görevlileri Birliği (AASHTO) tarafından 1956-1958 yılları arasında Ottawa / Illinois'te inşa edilen, çeşitli tip ve kalınlıkta kaplamalar ile küçük açıklıklı köprülerden oluşan deneme yolundaki gözlemlerin sonuçlarına dayanılarak hazırlanmıştır. Yolun farklı dingil yüklerini içeren trafik altındaki davranışı ve hizmet düzeyi 2 yıl boyunca gözlenmiş; ölçümler sonunda elde edilen veriler bilgisayarlardan da yararlanılarak değerlendirilip mevcut diğer tasarım yöntemleri ile mevcut teorik bilgileri destekleyen yeni bir tasarım yöntemi önerilerek 1962 yılında AASHO Rijit ve Esnek Üstyapıların Tasarımı Rehberi adıyla yayınlanmıştır. Rehber bir süre kullanıldıktan sonra AASHTO Tasarım Komitesi tarafından gözden geçirilip yenilenmiş ve 1972 yılında yeni hali yayınlanmıştır.

* Bu bölümdeki tablo ve şekiller AASHTO Interim Guide for Design of pavement Structures, 1993'ten alınmıştır.

Yıllar sonra, 1972'den o güne kadar üstyapı tasarımı ve analiz teknolojisindeki gelişmelerin de rehberde yerini alması gerektiği düşüncesiyle 1983 yılında Üstyapı Tasarımı Alt Komitesi ve bir müşavirler grubu çalışmalarına başlamış, 1986'da da AASHTO Üstyapı Tasarımı Rehberi yayınlanmıştır. Bu baskıda esnek üstyapı tasarım yöntemleriyle ilgili önemli değişiklikler olmuş, esnek üstyapıların tasarımı kısmen deneyimlere dayandırılmakla birlikte taban zemini taşıma gücü, trafik dingil yükleri ve tekrarı ile ilgili yerel koşullar ve ayrıca üstyapıda kullanılan malzemelerin birbirlerine göre direnç özellikleri de göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca yine 1986 baskısında; yöntemin Birleşik Devletler'de gözlenen farklı iklim, malzeme ve zeminlerde uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla da bir çok değişiklik ve yenilikler yapılmıştır.

1993 yılında AASHTO Tasarım Rehberi'nin gözden geçirilmiş bir hali yayınlanmış, bununla birlikte esnek üstyapı tasarım yöntemleri konusunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Esnek üstyapılarla ilgili AASHO Yol Testi'nde yer alan başlıca tasarım değişkenleri ve değer aralıkları aşağıdaki gibidir.

- AB Kalınlığı (Aşınma + binder) : 25 - 152 mm (1 - 6 in)
- Temel Tipleri : Kırmataş, çakıl, çimento katkılı çakıl, bitüm katkılı çakıl
- Temel Kalınlığı : 0 - 229 mm (0 - 9 in)
- Alt Temel Tipi : Kum / çakıl
- Zemin : Yalnızca siltli kil (A - 6)
- Araç Dingil Tipleri : Tek ve tandem dingil
- Tandem Dingil Ağırlıkları : 107 - 214 kN (24 - 48 kip)
- İklim : Kuzey Illinois iklimi
- Uygulanan Dingil Yüğü Sayısı : 1,114,000
- Maksimum 8.2 ton (18 kip) ESDY Uygulaması : 10,000,000 (en ağır yük)

AASHO Yol Testi belirli çevre ve malzeme koşulları için AC tabaka kalınlığı, yük büyüklüğü, dingil tipi, uygulanan yük miktarı ve servis yeteneği kaybı arasında ampirik bir bağıntı kurar. Yol Testi verileri' len elde edilen ilk ampirik model aşağıda verilmiştir.

$$\log (W) = \log (\rho) + \frac{G}{\beta} \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda;

- W : Son servis yeteneğine ulaşılan kadar uygulanan dingil yükü sayısı
 G : “t” anındaki servis yeteneği kaybının servis yeteneği 1.5 olana kadarki potansiyel kayba oranının fonksiyonu
 β : ρ -W servis yeteneği eğrisinin şeklini etkileyen tasarım ve yük değişkenlerinin fonksiyonu
 ρ : Servis yeteneği indisi 1.5’e düşene kadar uygulanması beklenen dingil yükü sayısını veren tasarım ve yük değişkenlerinin fonksiyonu

AASHTO Yol Testi’nde esnek üstyapılar için yük ve üstyapı değişkenleriyle ρ ve β terimleri arasında aşağıdaki bağıntılar bulunmuştur (AASHTO,1993).

$$\log (\rho) = 5.93 + 9.36 \cdot \log (SN + 1) - 4.79 \cdot \log (L_1 + L_2) + 4.33 \cdot \log L_2 \quad (4.2)$$

$$\beta = 0.40 + \frac{0.081 \cdot (L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \cdot L_2^{3.23}} \quad (4.3)$$

Eşitliklerde;

- SN : Üstyapı sayısı
 L_1 : Bir tek dingildeki veya tandem dingil grubundaki yük
 L_2 : Dingil kodu (tek dingil için “1”, tandem dingil için “2”)

1986’da yayınlanan rehberde yer alan “güvenilirlik” kavramı tasarımcıya üstyapı tasarımında karşılaşılabilecek belirsizliklere bir açıklık getirme imkanı verir. Bu kavram sayesinde tasarımcı belli bir risk düzeyine kadar elverişli tasarımlar yapabilir. Güvenilirlik ve toplam standart sapmanın bir fonksiyonu olan “Güvenilirlik Tasarım

Faktörü (F_R)” trafik tahminlerinde, üstyapı performansı tahmininde ve malzeme ile yapı özelliklerinin belirlenmesinde karşılaşılabilecek muhtemel hata payının bertaraf edilmesinde kullanılır.

1986 baskısında zemin destek sayısı yerine resilient modülüne yer verilmiştir. Resilient modülü malzeme özelliklerin belirlenmesinde gerçekçi bir test yöntemi kullanılmasına imkan verir. Stabilize ve stabilize olmayan malzemelerin tabaka katsayılarının belirlenmesinde de resilient modülü kullanılabilir.

AASHTO 86’da drenaj özelliklerini hesaba katmak için bir de drenaj faktörü (m_i) tanımlanmıştır.

Zeminlerin şişmesinin ve don kabarmasının etkilerini de tasarım esnasında göz önünde bulundurmak için 1986 baskısında bu konuya yer verilmiştir.

1986’da yayınlanan rehberde AASHTO Yol Testi’nden yararlanılarak üstyapı kalınlıklarının hesaplanmasında kullanılmak üzere üstyapıya etkileyen yükleri içine alan “AASHTO Deney Yolu Denklemi” kurulmuş aynı denklem AASHTO Tasarım Rehberi 1993’te de kullanılmıştır.

$$\log(W_{8.2}) = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log(M_R) - 8.07 \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte;

$W_{8.2}$: 8.2 ton (18-kip) eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) tekrar sayısı
(tasarım trafiği)

Z_R : Standart sapma

ΔPSI : Başlangıçtaki tasarım servis yeteneği indisi (P_o) ile son servis yeteneği (P_i) arasındaki fark, toplam servis yeteneği kaybı

M_R : Taban zemini efektif elastisite modülü (psi)

SN : Üstyapı kalınlığını bulmak için gerekli üstyapı sayısı

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 + \dots + a_i \cdot D_i \cdot m_i \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte;

a_i : i. tabakanın tabaka katsayısı

D_i : i. tabakanın kalınlığı (in)

m_i : i. tabakanın drenaj katsayısı

4.2.1 Esnek Üstyapının Tasarımı İçin Gerekli Veriler

Bu başlık altında AASHTO Tasarım Yöntemi için gerekli tasarım bilgileri anlatılmış ve bu bilgiler dört ayrı kategoride sınıflandırılmıştır (AASHTO,1993).

1. Genel tasarım değişkenleri

i. Zaman kısıtları

- Performans periyodu
- Analiz periyodu

ii. Trafik

iii. Güvenilirlik

iv. Çevresel etkiler

- Taban zemini şişmesi
- Don kabarması

2. Performans ölçütü - Servis yeteneği

3. Malzeme özellikleri

i. Taban zemini efektif elastisite modülü

ii. Üstyapı malzemeleri özellikleri

iii. Tabaka katsayıları

4. Üstyapı yapısal özellikleri

i. Drenaj

4.2.1.1 Genel Tasarım Değişkenleri

Genel tasarım değişkenleri herhangi bir üstyapının tasarımında mutlaka hesaba katılması gereken değişkenlerdir. Bu kategoride seçilmiş performans ve analiz periyodları gibi zaman kısıtları, trafik, tasarım güvenilirliği ile yol yatağı şişmesi, don kabarması gibi çevresel etkiler yer almaktadır.

4.2.1.1.1 Zaman Kısıtları

Üstyapının tasarımı için “Performans Periyodu” ve “Analiz Periyodu”nun seçilmesi gereklidir.

Performans Periyodu : Yolun hizmete açıldığı tarihten ilk takviye tabakasının yapılacağı tarihe kadar geçen süreyi veya birden fazla takviye yapılmışsa takviye işlemleri arasında geçen süreleri belirtir. Diğer bir deyişle üstyapının başlangıç servis yeteneği indisinden (P_0) seçilen son servis yeteneği indisine (P_t) düştüğü ana kadar geçen süreyi ifade eder. Performans periyodunun minimum ve maksimum değerleri belirlenirken karayolu ile ilgili kurumların geçmişteki deneyimleri, inşaatın başlangıcında mevcut kaynakların durumu, bakım işlemlerinin düzeyi ve türü gibi konular göz önünde bulundurulmalıdır. Minimum performans periyodu üstyapının hizmet kalitesinin biteceği en kısa süreyi ifade eder. Maksimum performans periyodu ise kullanıcının öngörülen servis derecesine göre bekleyebileceği en uzun süreyi belirtir.

Analiz Periyodu : Performans periyodlarının toplamı olarak ifade edilebilir ve ilk performans periyodunu ve devamında yapılan bir veya daha fazla takviyeyi içerir. Geçmişte üstyapılar genellikle 20 yıl için tasarlanıyor ve analiz ediliyordu. Kazanılan deneyimler üstyapı ömrünün 20 yıldan fazla olduğunu göstermiştir. Sonuçta üstyapıların analiz analiz süreleri artırılmıştır. *Tablo 4.1'*de esnek üstyapılar için AASHTO 93'te önerilen analiz periyodları verilmiştir.

Tablo 4.1 Tavsiye edilen analiz periyodları

Karayolu Şartları	Analiz Periyodu (yıl)
Yüksek hacimli kentiçi yollar	30 - 50
Yüksek hacimli kentlerarası yollar	20 - 50
Düşük hacimli kaplamalı yollar	15 - 25

4.2.1.1.2 Trafik

AASHTO Tasarım Yöntemleri analiz periyodu süresince taşınacak toplam 8.2 ton (18-kip) eşdeğer standart dingil yüküne (ESDY) dayanır. Dingil yükleri AASHO Yol Testi’nden elde edilen Yük Eşdeğerlik Faktörleri (YEF) kullanılarak ESDY’ne dönüştürülür. Tasarım trafiğinin belirlenebilmesi için Yön Dağıtma Faktörü (D_Y) ve Şerit Dağıtma Faktörü (D_S) kullanılarak sistem üzerindeki toplam ESDY’nin ayarlanması gerekir (AASHTO,1993).

AASHTO rehberinde trafik tahminleri trafik analiz süresi için yapılır. Yolun hizmete açıldığında trafik “ilk trafik”, trafik analiz süresi sonundaki trafik ise “son trafik” olarak adlandırılır. İlk ve son trafik değerleri yardımıyla trafik analiz süresi için saptanan trafik değeri üstyapı hesabında tasarım trafiği olarak kullanılır.

Trafik sayımlarıyla her bir araç grubu için günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (r) belirlendikten sonra “t” yıl sonraki günlük trafik (t_t) aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$t_t = t_0 \cdot (1 + r)^t \quad (4.6)$$

formülüyle bulunur.

İlk yıl için günlük trafik (t_0) ve son yıl için günlük trafik (t_t) belirlendikten sonra “t” süresi için günlük trafik analiz trafiğinin (t_p) hesaplanması için;

$$t_p = 0.4343 \cdot \frac{t_t - t_0}{\log \frac{t_t}{t_0}} \quad (4.7)$$

formülü kullanılır. Yoldan analiz süresince geçecek toplam trafik (T_p) ise:

$$T_p = t_p \cdot 365 \cdot t \quad (4.8)$$

formülüyle hesaplanır.

Her bir trafik grubu için belirlenen trafik sayıları taşıt eşdeğerlik faktörleri (*Tablo 4.2*) ile çarpılıp 8.2 ton (18-kip) ESDY'ne dönüştürülür ve toplamaları alınır.

Tablo 4.2 Taşıt eşdeğerlik faktörleri

Trafik	Trafik kategorisi (ticari araç / gün)				
Grubu	0 - 250	250 - 500	500 - 1,500	1,500 - 3,000	> 3,000
Kamyon	1.74	1.83	1.96	2.04	2.18
Treyler	2.78	2.88	3.06	3.15	3.35
Otobüs	0.90	0.90	0.95	0.95	0.98
Otomobil	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006

Günlük ortalama trafik hacmi trafik gruplarına göre değil de değişik dingil yükü gruplarına göre verilmişse analiz süresi için toplam eşdeğer dingil sayısı “dingil eşdeğerlik faktörleri” (YEF) kullanılarak hesaplanır.

Tek dingil yüklerini standart dingil sayısına yaklaşık olarak dönüştürmek için;

$$X = \left(\frac{P}{P_{8.2}} \right)^n \quad (4.9)$$

üssel fonksiyonu kullanılabilir. Buradaki “n” değeri genel olarak 3.5 ile 4.5 değerleri arasında değişen bir değer alır. Dingil eşdeğerlik faktörleri *Tablo 4.4 - 4.12*'de son servis yeteneği indisi (P_t), dingil tipleri ve üstyapı sayısına bağlı olarak verilmiştir. Bu faktörler yardımıyla tasarım trafiği ESDY cinsinden hesaplanabilir.

Tasarım şeridindeki trafiğin ($W_{8.2}$) hesaplanmasında aşağıda verilen bağıntı kullanılır.

$$W_{8.2} = \hat{W}_{8.2} \cdot D_Y \cdot D_S \quad (4.10)$$

Bu bağıntıda;

$\hat{W}_{8.2}$: İki yöndeki toplam 8.2 ton (18-kip)

D_Y : Yön dağıtma faktörü. Trafiğin yönlere göre dağılımını belirlemeye yarar, yüzde olarak ifade edilir ve genellikle 0.5 değerini alır. Her iki yönde, farklı sayı ve ağırlıkta trafiğe hizmet eden yollarda 0.3 ile 0.7 değerleri arasında değişebilir.

D_S : Şerit dağıtma faktörü. Trafiğin şeritlere göre dağılımını belirlemekte kullanılır, yüzde olarak ifade edilir ve şerit sayısına bağlı olarak değişir. AASHTO 93'te esnek üstyapılar için önerilen D_S değerleri *Tablo 4.3*'te verilmiştir (AASHTO,1993).

Tablo 4.3 Şerit sayısına göre tavsiye edilen şerit dağıtma faktörleri

Bir yöndeki şerit sayısı	Tasarım şeridindeki 8.2 ton ESDY (%)
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Tablo 4.4 Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_1 = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.030	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.750	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.40	10.00	9.20	8.60	8.70	9.20
32	14.00	13.50	12.40	11.50	11.50	12.10
34	18.50	17.90	16.30	15.00	14.90	15.60
36	24.20	23.30	21.20	19.30	19.00	19.90
38	31.10	29.90	27.10	24.60	24.00	25.10
40	39.60	38.00	34.30	30.90	30.00	31.20
42	49.70	47.70	43.00	38.60	37.20	38.50
44	61.80	59.30	53.40	47.60	45.70	47.10
46	76.10	73.00	65.60	58.30	55.70	57.00
48	92.90	89.10	80.00	70.90	67.30	68.60
50	113.00	108.00	97.00	86.00	81.00	82.00

Tablo 4.5 Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.40	10.10	9.30	8.80	9.00	9.40
58	12.20	11.80	10.90	10.30	10.40	10.90
60	14.30	13.80	12.70	11.90	12.00	12.60
62	16.60	16.00	14.70	13.70	13.80	14.50
64	19.30	18.60	17.00	15.80	15.80	16.60
66	22.20	21.40	19.60	18.00	18.00	18.90
68	25.50	24.60	22.40	20.60	20.50	21.50
70	29.20	28.10	25.60	23.40	23.20	24.30
72	33.30	32.00	29.10	26.50	26.20	27.40
74	37.80	36.40	33.00	30.00	29.40	30.80
76	42.80	41.20	37.30	33.80	33.10	34.50
78	48.40	46.50	42.00	38.00	37.00	38.60
80	54.40	52.30	47.20	42.50	41.30	43.00
82	61.10	58.70	52.90	47.60	46.00	47.80
84	68.40	65.70	59.20	53.00	51.20	53.00
86	76.30	73.30	66.00	59.00	56.80	58.60
88	85.00	81.60	73.40	65.50	62.80	64.70
90	94.40	90.60	81.50	72.60	69.40	71.30

Tablo 4.6 Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 2.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.028	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.06	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.20	10.80	1.10	9.60	9.80	10.20
84	12.50	12.10	11.20	10.60	10.80	11.30
86	13.90	13.50	12.50	11.80	11.90	12.50
88	15.50	15.00	13.80	13.00	13.20	13.80
90	17.20	16.60	15.30	14.30	14.50	15.20

Tablo 4.7 Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.30	9.50	7.90	6.80	7.00	7.80
32	13.90	12.80	10.50	8.80	8.90	10.00
34	18.40	16.90	13.70	11.30	11.20	12.50
36	24.00	22.00	17.70	14.40	13.90	15.50
38	30.90	28.30	22.60	19.10	17.20	19.00
40	39.30	35.90	28.50	22.50	21.10	23.00
42	49.30	45.00	35.60	27.80	25.60	27.70
44	61.30	55.90	44.00	34.00	31.00	33.10
46	75.50	68.80	54.00	41.40	37.20	39.30
48	92.20	83.90	65.70	50.10	44.50	46.50
50	112.00	102.00	79.00	60.00	53.00	55.00

Tablo 4.8 Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
10	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
12	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.043
18	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
20	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
22	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
24	0.231	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
26	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
28	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
30	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.30	9.60	8.10	7.20	7.40	8.20
58	12.10	11.30	9.40	8.20	8.40	9.40
60	14.20	13.10	10.90	9.40	9.60	10.70
62	16.50	15.30	12.60	10.70	10.80	12.10
64	19.10	17.60	14.50	12.20	12.20	13.70
66	22.10	20.30	16.60	13.80	13.70	15.40
68	25.30	23.30	18.90	15.60	15.40	17.20
70	29.00	26.60	21.50	17.60	17.20	19.20
72	33.00	30.30	24.40	19.80	19.20	21.30
74	37.50	34.40	27.60	22.20	21.30	23.60
76	42.50	38.90	31.10	24.80	23.70	26.10
78	48.00	43.90	35.00	27.80	26.20	28.80
80	54.00	49.40	39.20	30.90	29.00	31.70
82	60.60	55.40	43.90	34.40	32.00	34.80
84	67.80	61.90	49.00	38.20	35.30	38.10
86	75.70	69.10	54.50	42.30	38.80	41.70
88	84.30	76.90	60.60	46.80	42.60	45.60
90	93.70	85.40	67.10	51.70	46.80	49.70

Tablo 4.9 Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 2.5$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
16	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
18	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
24	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
28	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
32	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
34	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
36	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
38	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
40	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
42	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
44	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692
46	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
48	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.10	10.40	8.80	7.90	8.20	9.00
84	12.40	11.60	9.80	8.60	8.90	9.90
86	13.80	12.90	10.80	9.50	9.80	10.90
88	15.40	14.30	11.90	10.40	10.60	11.90
90	17.10	15.80	13.20	11.30	11.60	12.90

Tablo 4.10 Esnek üstyapılarda tek dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
4	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
6	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
8	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
10	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
12	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
14	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
16	0.594	0.633	0.694	0.693	0.651	0.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.20	8.90	6.50	5.00	5.10	6.30
32	13.80	12.00	8.40	6.20	6.30	7.70
34	18.20	15.70	10.90	7.80	7.60	9.30
36	23.80	20.40	14.00	9.70	9.10	11.00
38	30.60	26.20	17.70	11.70	11.00	13.00
40	38.80	33.20	22.20	14.60	13.10	15.30
42	48.80	41.60	27.60	17.80	15.50	17.80
44	60.60	51.60	34.00	21.50	18.40	20.60
46	74.70	63.40	41.50	26.10	21.60	23.80
48	91.20	77.30	50.30	31.30	25.40	27.40
50	110.00	94.00	61.00	37.00	30.00	32.00

Tablo 4.11 Esnek üstyapılarda tandem dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
6	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
8	0.006	0.011	0.009	0.005	0.003	0.003
10	0.011	0.024	0.020	0.012	0.008	0.007
12	0.019	0.042	0.039	0.024	0.017	0.014
14	0.031	0.066	0.068	0.045	0.032	0.026
16	0.049	0.096	0.109	0.076	0.055	0.046
18	0.075	0.134	0.164	0.121	0.090	0.076
20	0.113	0.181	0.232	0.182	0.139	0.119
22	0.166	0.241	0.313	0.260	0.205	0.178
24	0.238	0.317	0.407	0.358	0.292	0.257
26	0.333	0.413	0.517	0.476	0.402	0.360
28	0.457	0.534	0.643	0.614	0.538	0.492
30	0.616	0.684	0.788	0.773	0.702	0.656
32	0.817	0.870	0.956	0.953	0.896	0.855
34	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	10.20	9.00	6.70	5.40	5.70	6.90
58	12.00	10.60	7.70	6.10	6.40	7.70
60	14.10	12.30	8.90	6.80	7.10	8.60
62	16.30	14.20	10.20	7.70	7.80	9.50
64	18.90	16.40	11.60	8.60	8.60	10.50
66	21.80	18.90	13.20	9.60	9.50	11.60
68	25.10	21.70	15.00	10.70	10.50	12.70
70	28.70	24.70	17.00	12.00	11.50	13.90
72	32.70	28.10	19.20	13.30	12.60	15.20
74	37.20	31.90	21.60	14.80	13.80	16.50
76	42.10	36.00	24.30	16.40	15.10	17.90
78	47.50	40.60	27.30	18.20	16.50	19.40
80	53.40	45.70	30.50	20.10	18.00	21.00
82	60.00	51.20	34.00	22.20	19.60	22.70
84	67.10	57.20	37.90	24.60	21.30	24.50
86	74.90	63.80	42.10	27.10	23.20	26.40
88	83.40	71.00	46.70	29.80	25.20	28.40
90	92.70	78.80	51.70	32.70	27.40	30.50

Tablo 4.12 Esnek üstyapılarda üçlü dingil ve $P_t = 3.0$ için dingil yükü eşdeğerlik faktörleri

Dingil Yükü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
8	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
10	0.005	0.008	0.005	0.003	0.002	0.002
12	0.007	0.014	0.010	0.006	0.004	0.003
14	0.011	0.023	0.018	0.011	0.007	0.006
16	0.016	0.035	0.030	0.018	0.013	0.010
18	0.022	0.050	0.047	0.029	0.020	0.017
20	0.035	0.069	0.069	0.044	0.031	0.026
22	0.043	0.090	0.097	0.065	0.046	0.039
24	0.059	0.116	0.132	0.092	0.066	0.056
26	0.079	0.145	0.174	0.126	0.092	0.078
28	0.104	0.179	0.223	0.168	0.126	0.107
30	0.136	0.218	0.279	0.219	0.167	0.143
32	0.176	0.265	0.342	0.279	0.218	0.188
34	0.226	0.319	0.413	0.350	0.279	0.243
36	0.286	0.382	0.491	0.432	0.352	0.310
38	0.359	0.456	0.577	0.524	0.437	0.389
40	0.447	0.543	0.671	0.626	0.536	0.483
42	0.550	0.643	0.775	0.740	0.649	0.593
44	0.673	0.760	0.889	0.865	0.777	0.720
46	0.817	0.894	1.014	1.001	0.920	0.865
48	0.984	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
50	1.18	1.23	1.30	1.31	1.26	1.22
52	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
58	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
60	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
62	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
64	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
66	4.09	3.79	3.26	3.04	3.27	3.58
68	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
70	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
72	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
74	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
76	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
78	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
80	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
82	11.00	9.80	7.40	6.00	6.40	7.70
84	12.30	10.90	8.10	6.50	6.90	8.30
86	13.70	12.10	8.90	7.00	7.40	9.00
88	15.30	13.40	9.80	7.60	8.00	9.60
90	16.90	14.80	10.70	8.20	8.50	10.40

4.2.1.1.3 Güvenilirlik

Güvenilirliğin genel tanımları şunlardır:

- Güvenilirlik servis yeteneği indeksinde beklenmeyen kayıplar sonucu bakım gerekebileceği ihtimalini dikkate alır.
- Üstyapının trafik yüklerine minimum bir dirençle karşı koyması durumunda oluşabilecek aksaklıkları gidermeye çalışır.
- Üstyapının mevcut koşullar altında beklenen performansı gösterememe durumunu hesaba katarak bu gibi hallerde yolun beklenen hizmeti verememesi ihtimalini ortadan kaldırır (AĞAR,1996).

Ayrıca,

- Üstyapının ömrü boyunca doğabilecek, gözle görülebilecek özel bir takım aksaklıkların da olabileceğini göz önünde bulundurur.
- Çevre şartlarında değişiklikler olması ve fazla trafik doğması gibi durumlarda da güvenilirlik faktörü işlevini yerine getirmeye çalışır (AĞAR,1996).

Yukarıda sözü edilen durumlar için, hesaplanan trafik değeri güvenilirlik faktörü ile artırılarak istenen ömürde hizmet verebilme imkanı sağlanır.

“ F_R ” ile temsil edilen tasarım güvenilirlik faktörü kullanılmak suretiyle tasarım trafiğini tahmin riski azaltılıp üstyapı performansı artırılmaya çalışılır.

F_R değerini bulmak için öncelikle yolun sınıfı belirlenir. İkinci adım olarak *Tablo 4.13*'ten yolun sınıfı için önerilen güvenilirlik seviyesi oranı (R) bulunur. Üçüncü aşamada *Tablo 4.14*'ten “ R ”ye bağlı normal standart sapma (Z_R) değeri alınır. Bunun ardından toplam standart sapma değeri (S_o) seçilir ki bu değer esnek üstyapılar için 0.40 ile 0.50 değerleri arasında değişir. Son olarak aşağıdaki formülle “ F_R ” değeri hesaplanır (AĞAR, 1996).

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0} \quad (4.11)$$

Tablo 4.13 Yol sınıfları için önerilen Güvenilirlik seviyesi oranları

Yol Sınıfı	Kent içi	Kentler arası
Otoyollar ve devlet yolları	85 - 99.9	80 - 99.9
İl yolları ve ana arterler	80 - 99	75 - 95
Toplama yolları	80 - 95	75 - 95
Mahalli yollar veya tali yollar	50 - 80	50 - 80

Tablo 4.14 Güvenilirlik oranlarına bağlı olarak verilen standart sapma değerleri

Güvenilirlik Seviyesi Oranı (R) %	Standart normal sapma (Z _R)
50	- 0.000
60	- 0.253
70	- 0.524
75	- 0.674
80	- 0.841
85	- 1.037
90	- 1.282
91	- 1.340
92	- 1.405
93	- 1.476
94	- 1.555
95	- 1.645
96	- 1.751
97	- 1.881
98	- 2.054
99	- 2.327
99.9	- 3.090
99.99	- 3.750

“F_R” değeri hesaplandıktan sonra tahmin edilen trafik “ $\hat{W}_{8.2}$ ” ile çarpılıp performans trafiği bulunur.

$$W_{8.2} = \hat{W}_{8.2} \cdot F_R \quad (4.12)$$

4.2.1.1.4 Çevresel Etkiler

Çevre üstyapı performansına birkaç yolla etki edebilir. Sıcaklıkta ve nem oranında olacak değişiklikler gerilmeler üzerinde, dengenin sağlanmasında, yük taşıma kapasitelerinde ve taban zemini malzemeleri üzerinde etkiler meydana getirebilmektedir. Diğer başlıca çevresel etkiler de taban zemini şişmesi, üstyapı

şışmesi, don kabarması, dağılmalar vb. gibi doğrudan oluşan tesirler seyir kalitesinde ve servis yeteneği indisinde kayıplara neden olur.

Servis yeteneği indisindeki kaybın belli bir oranını teşkil eden taban zemini şışmesi ve don kabarması olayları potansiyel etkileri olan önemli çevresel faktörlerdir.

Şışme taban zemininin nem alarak genişlemesi şeklinde olur. Bu olay sonucunda hacim değişikliği meydana gelir. Zeminin nem emmesini azaltmak için etkili bir drenaj sistemi oluşturmak gerekir. Bu şekilde taban zemininin nem alması ve dolayısıyla şışmesi azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir (AASHTO,1993).

Don kabarması da taban zemininde birikmiş nemin donarak zeminin hacminde değişmelere yol açması sonucunda oluşur. Bu hacim değişikliğinin homojen şekilde gerçekleşmemesi kaplama tabakasında bükülmelerin ve bozulmaların ortaya çıkmasına neden olur. Yüzeysel olarak görülebilen bu kabarmalar taban zemininin şışmesinde olduğu şekilde etkili bir drenajla azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir.

Hem taban zemini şışmesinin hem de don kabarmasının servis yeteneği kaybını artırıcı etkileri vardır. Bunlara bağlı olarak takviye tabakasını erken yapmak gerekebilir (AASHTO,1993).

Trafik, don kabarması ve taban zemini şışmesinin servis yeteneği indisi üzerindeki etkisi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{\text{trafik}} + \Delta PSI_{\text{don kabarması}} + \Delta PSI_{\text{şışme}} \quad (4.13)$$

Bu eşitlikte;

ΔPSI : Servis yeteneği indisindeki toplam azalma

$\Delta PSI_{\text{trafik}}$: Servis yeteneği indisinde trafik nedeniyle oluşan azalma

$\Delta PSI_{\text{don kabarması}}$: Servis yeteneği indisinde don kabarması nedeniyle oluşan azalma

$\Delta PSI_{\text{şişme}}$: Servis yeteneği indisinde şişme nedeniyle oluşan azalma

Çevresel etkilere (don kabarması ve şişme) bağlı olarak servis yeteneği indisinde gözlenen kaybın değeri aşağıdaki eşitlikten ve *Şekil 4.1*'den bulunabilir.

$$\Delta PSI_{\text{ş d.k.}} = \Delta PSI_{\text{don kabarması}} + \Delta PSI_{\text{şişme}} \quad (4.14)$$

4.2.1.2 Performans Kriteri

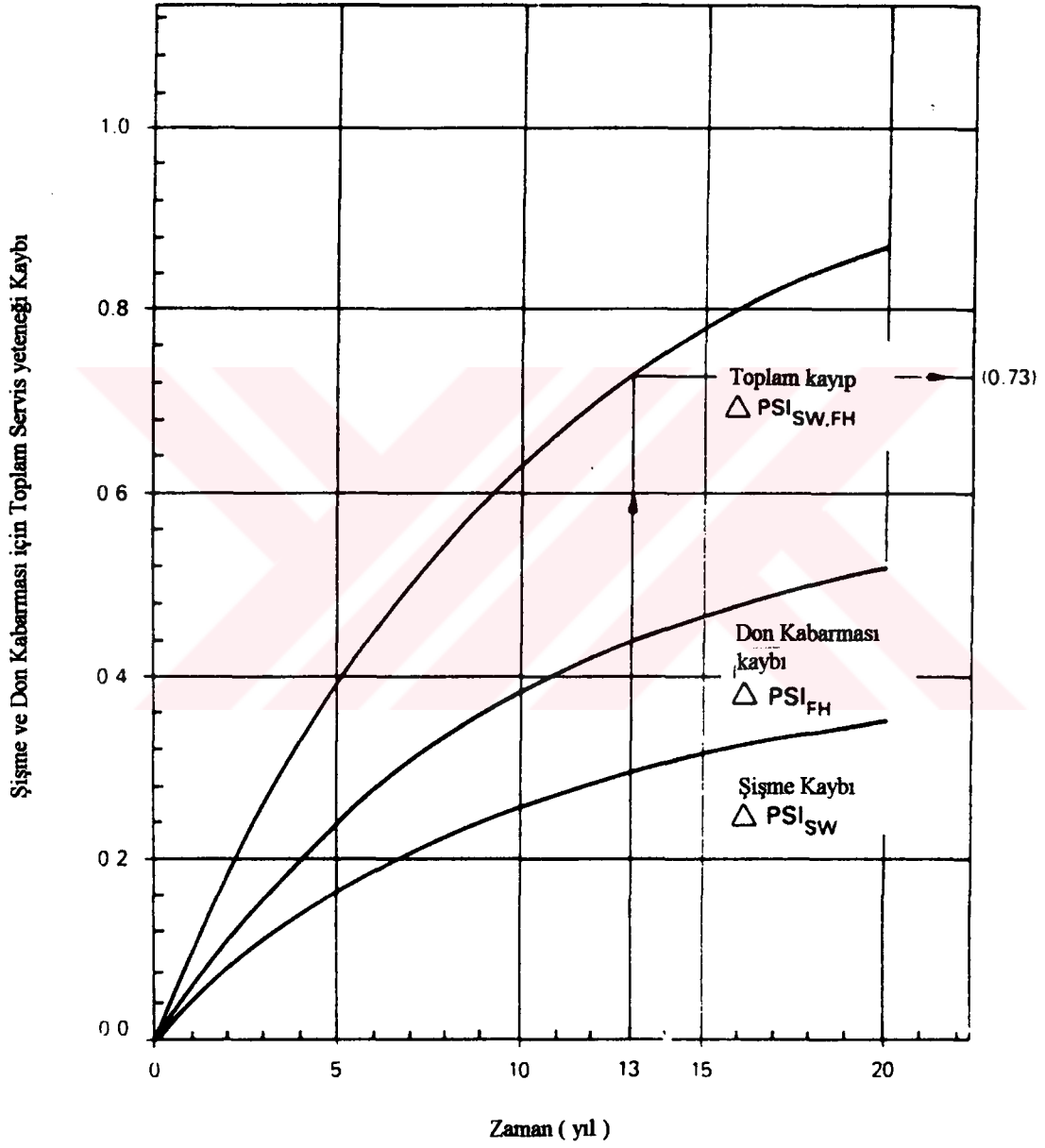
Servis yeteneği bir üstyapının yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet edebilme yeteneğidir. Servis yeteneği derecesi karayolu mühendisliği konularında uzman kişilerden meydana gelen bir kurulun, karayolundan yararlanan kimseler sıfatıyla, yola verdikleri bireysel değerlendirmelerin ortalaması alınarak bulunur. Servis yeteneği derecesi için “0” en kötü, “5” en iyi olmak üzere 0 ile 5 arasında değişen bir ölçek tesbit edilmiştir (AASHTO,1993).

Üstyapı tasarımı için başlangıç ve son servis yeteneği indislerinin seçilmesi gerekir. Başlangıç servis yeteneği indisi (P_0) üstyapı tasarımının ve kalitesinin bir fonksiyonudur. Son servis yeteneği indisi (P_1) ise takviye tabakası yapılmadan önce gözlenen kabul edilebilir en düşük değerdir.

AASHTO 93'te esnek üstyapılar için önerilen başlangıç ve son servis yeteneği indisleri *Tablo 4.15*'teki gibidir.

Tablo 4.15 Esnek üstyapılar için önerilen başlangıç ve son servis yeteneği indisleri

Üstyapı Tipi	Başlangıç Servis Yeteneği
Esnek	4.2
Yol Tipi	Son Servis Yeteneği
Anayollar	≥ 2.5
Daha düşük sınıflı yollar	2.0



Şekil 4.1. Belli bir bölge için zamana bağlı olarak toplam çevresel servis yeteneği kaybı

4.2.1.3 Yapısal Tasarım İçin Malzeme Özellikleri

4.2.1.3.1 Taban Zemini Elastisite Modülü

Taban zemininin elastisite modülü zemin örneğine mevsim koşulları altında AASHO T 274'te belirtilen esaslara göre uygulanan üç eksenli basınç deneyleri sonunda tespit edilir. Elastisite modülünün hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılır.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon} \quad (4.15)$$

Bu eşitlikte;

- M_R : Elastisite modülü,
- σ_d : Deviatör gerilme (σ_1, σ_3),
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler,
- ϵ : Birim şekil değiştirmedir.

Elastisite modülü mevsimlere bağlı olarak değişebildiği için yağışlı ve yağışsız mevsimler için ayrı ayrı testler yapılarak nem oranı ile M_R değeri arasındaki ilişkinin saptanması gerekir (AASHTO,1993).

Karşı seçenek olarak elastisite modülünün belirlenmesi için gerekli alet ve malzemelerin mevcut olmadığı durumlarda kullanılmak üzere M_R ile CBR arasındaki ilişki araştırılmış ve aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

$$M_R = 107 \cdot CBR \quad (N/m^2) \quad (4.16a)$$

$$M_R = 1500 \cdot CBR \quad (lb/in^2) \quad (4.16b)$$

$$M_R = 110 \cdot CBR \quad (kg/cm^2) \quad (4.16c)$$

4.2.1.3.2 Üstyapı Tabakalarının Tabaka Katsayıları ve Elastisite Modülleri

AASHTO esnek üstyapı tabaka katsayısı (a_i) verilen malzemenin birim kalınlığının yapısal bileşeni olarak davranabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Söz gelişi tabaka katsayısı 0.2 olan 50.8 mm (2 in) kalınlığındaki malzemenin, tabaka katsayısı 0.4 ve kalınlığı 25.4 mm (1 in) olan malzemeyle aynı yapısal katkıyı sağlayacağı varsayılır.

Tabaka katsayıları malzemenin yük taşıma yeteneğinin bir göstergesi olmakla birlikte dayanıklılığını tam olarak yansıtmaz.

Tabaka katsayıları test yollarından derlenen bilgiler kullanılarak belirlenebileceği gibi resilient veya elastik modül gibi malzeme özelliklerine dayalı, daha önceden geliştirilmiş bağıntılar kullanılarak da bulunabilir. AASHTO 93'te beş malzeme grubu için tabaka katsayılarının belirlenmesiyle ilgili bilgiler verilmiştir.

Asfalt Betonu Kaplama Tabakası : Asfalt betonunun elastisite modülü 20 °C (68 °F) sıcaklıkta deneyle belirlenir. Asfalt termal çatlamalara ve yorulma çatlaklarına karşı daha hassas hale geleceği için elastisite modülünün (E_{AC}) 3100 MPa (450,000 psi) değerini aşması istenmez.

Kaplama tabakasına ait tabaka katsayısı (a_1) E_{AC} 'ye bağlı olarak *Şekil 4.2'*den bulunur.

Granüler Temel Tabakası : Granüler temel tabakasının tabaka katsayısı (a_2) elastisite modülüne (E_{BS}) bağlı olarak *Şekil 4.3'*ten bulunabileceği gibi aşağıdaki eşitlik kullanılarak da hesaplanabilir.

$$a_2 = 0.249 \cdot \log E_{BS} - 0.977 \quad (4.17)$$

Agrega temeller için E_{BS} tabaka içindeki gerilme değerlerinin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak bulunur.

$$E_{BS} = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (4.18)$$

Bu eşitlikte;

- θ : Gerilme durumu veya asal gerilmelerin toplamı ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$),
 k_1 ve k_2 : Malzemenin tipine bağlı regresyon sabitleridir. Temel ve alt temel malzemeleri için tipik değerleri *Tablo 4.16*'da verilmiştir.

Tablo 4.16 Temel ve alt temel malzemeleri için tipik k_1 ve k_2 değerleri

Nem Durumu	k_1	k_2
Temel		
Kuru	6,000 - 10,000	0.5 - 0.7
Nemli	4,000 - 6,000	0.5 - 0.7
Islak	2,000 - 4,000	0.5 - 0.7
Alt temel		
Kuru	6,000 - 8,000	0.4 - 0.6
Nemli	4,000 - 6,000	0.4 - 0.6
Islak	1,500 - 4,000	0.4 - 0.6

AASHO Yol Testi'nde temel tabakası için E_{BS} (psi) değerleri *Tablo 4.17*'deki gibidir.

Tablo 4.17 Gerilme Durumu - Elastisite Modülü ilişkisi

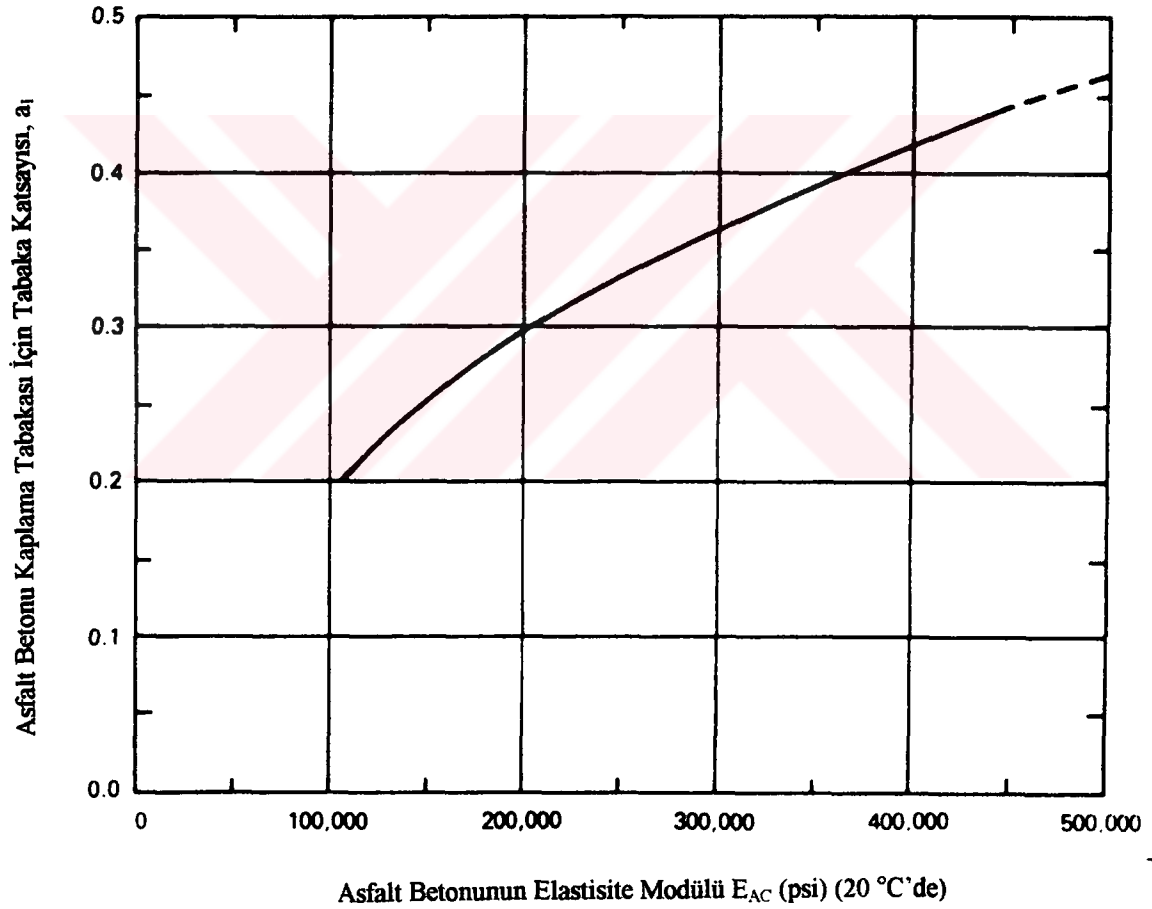
Nem Durumu	Elastisite modülü eşitliği (E_{BS})	Gerilme durumu (psi)			
		$\theta = 5$	$\theta = 10$	$\theta = 20$	$\theta = 30$
Kuru	$8,000 \cdot \theta^{0.6}$	21,012	31,848	48,273	61,569
Nemli	$4,000 \cdot \theta^{0.6}$	10,506	15,924	24,136	30,784
Islak	$3,200 \cdot \theta^{0.6}$	8,404	12,739	19,309	24,627

Dikkat edilirse E_{BS} 'nin yalnızca nem durumunun değil gerilme durumunun da (θ) bir fonksiyonu olduğu görülür. Temel tabakası içindeki "θ" değerleri zemin modülü ve yüzey tabakası kalınlığı ile değişir. Uygulama için önerilen tipik değerler *Tablo 4.18*'deki gibidir.

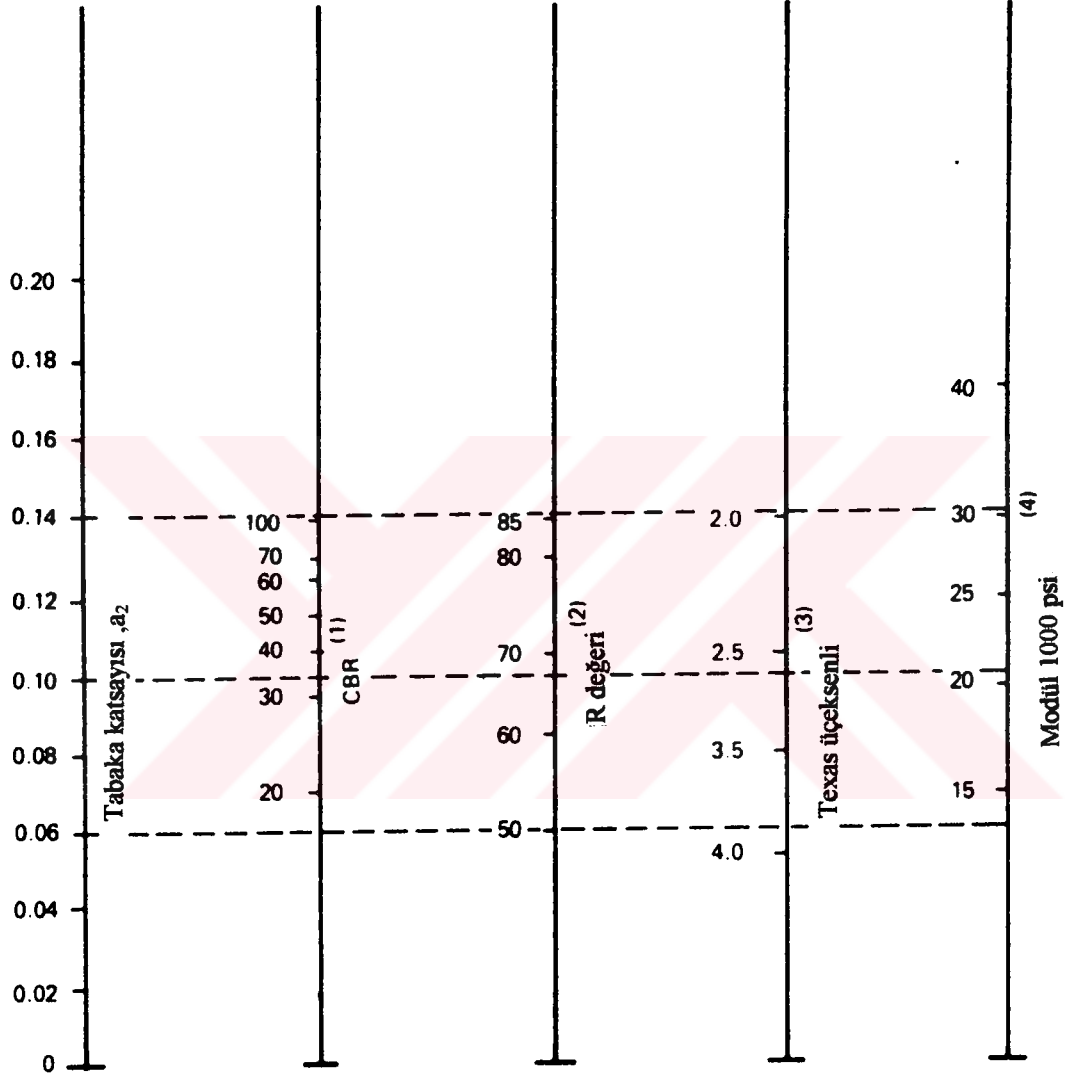
Tablo 4.18'den alınan "θ" değeri kullanılarak ve nem durumu da dikkate alınarak *Tablo 4.17*'deki eşitlikler yardımıyla temel tabakasının elastisite modülü (E_{BS}) bulunur

Tablo 4.18 Temel tabakası için taban zemini elastisite modülü (M_R) ile asfalt betonu kalınlığı değerlerine bağlı olarak kullanılması gereken “ θ ” değerleri

Asfalt Betonu Kalınlığı “ D_1 ” (in)	Taban Zemini Elastisite Modülü “ M_R ” (psi)		
	3,000	7,500	15,000
2’den az ($D_1 < 50.8$ mm)	20	25	30
2 - 4 ($50.8 < D_1 < 101.6$ mm)	10	15	20
4 - 6 ($101.6 < D_1 < 152.4$ mm)	5	10	15
6’den fazla (152.4 mm $> D_1$)	5	5	5



Şekil 4.2. Asfalt betonunun tabaka katsayısının (a_1) resilient modüle bağlı olarak bulunması



1. Ölçek Illinois'te elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek California, New Mexico ve Wyoming'den elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
3. Ölçek Texas'tan elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
4. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

Şekil 4.3. Granüler temelin tabaka katsayısının (a_2) farklı gerilme değerlerine bağlı olarak bulunması

Granüler Alt Temel Tabakası : Granüler alt temel tabakasının tabaka katsayısı (a_3) elastisite modülüne (E_{SB}) bağlı olarak *Şekil 4.4'*ten bulunabilir.

Ayrıca aşağıdaki formül yardımıyla da " a_3 " hesaplanabilir.

$$a_i = 0.227 \cdot \log E_{SB} - 0.839 \quad (4.19)$$

Agrega alt temel tabakaları için " E_{SB} ", temel tabakasındakine benzer şekilde, gerilme durumundan (θ) etkilenir. Asfalt betonu tabakası kalınlıklarına bağlı olarak alt temel tabakası için " θ " değerleri *Tablo 4.19'*da verilmiştir.

*Tablo 4.19'*dan alınacak " θ " değerleri *Tablo 4.20'*deki uygun bağıntılarda kullanılarak alt temel tabakasının elastisite modülü (E_{SB}) hesaplanır.

Tablo 4.19 Alt temel için " θ " değerleri

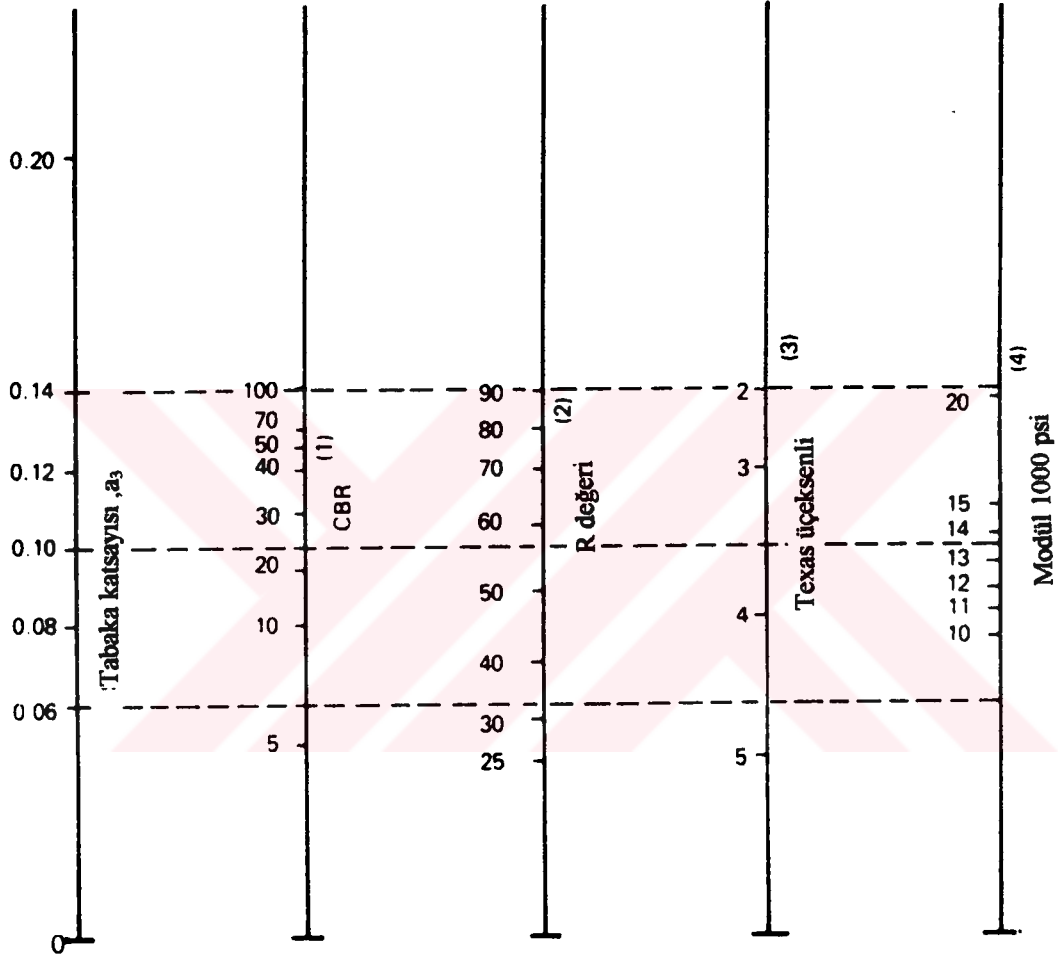
Asfalt Betonlu Kaplama Kalınlığı (in)	Gerilme Durumu " θ " (psi)
2'den az ($D_1 < 50.8$ mm)	10.0
2 - 4 ($50.8 < D_1 < 101.6$ mm)	7.5
4'ten fazla ($101.6 < D_1$)	5.0

Tablo 4.20 Gerilme Durumu " θ " - Elastisite Modülü " E_{SB} " ilişkisi

Nem Durumu	Geliştirilmiş Eşitlik (E_{SB})	Gerilme Durumu " θ " (psi)		
		$\theta = 5$	$\theta = 7.5$	$\theta = 10$
Nemli	$5,400 \cdot \theta^{0.6}$	14,183	18,090	21,497
Islak	$4,600 \cdot \theta^{0.6}$	12,052	15,410	18,312

Alt temel tabakasının elastisite modülü aşağıdaki formül kullanılarak da bulunabilir.

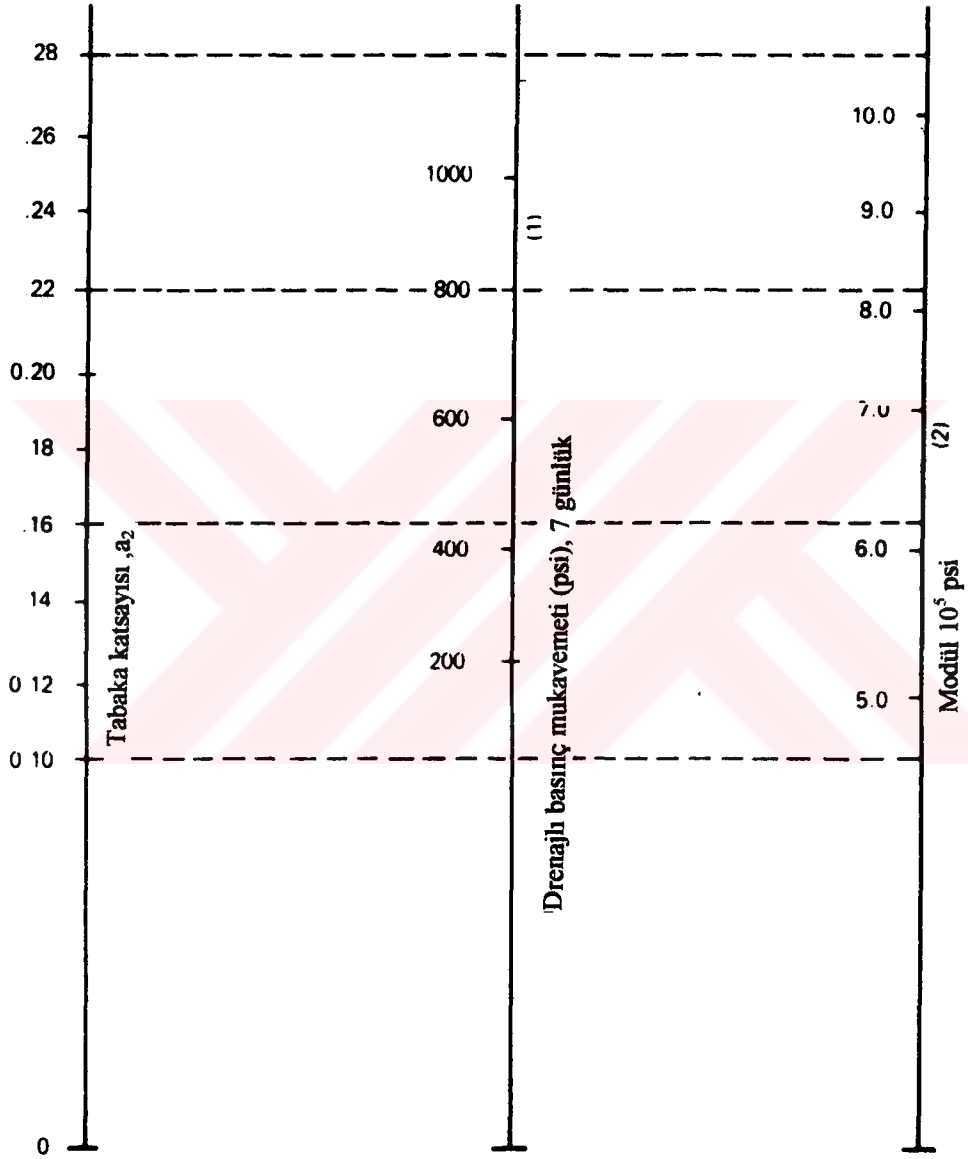
$$E_{SB} = k_1 \cdot \theta^k \quad (4.20)$$



1. Ölçek İllinoisde elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek California, New Mexico ve Wyomingden elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
3. Ölçek Texas'tan elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
4. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

ŞEKİL 4.4. Granüler alt temel tabakasının tabaka katsayısının (a_3) bulunması

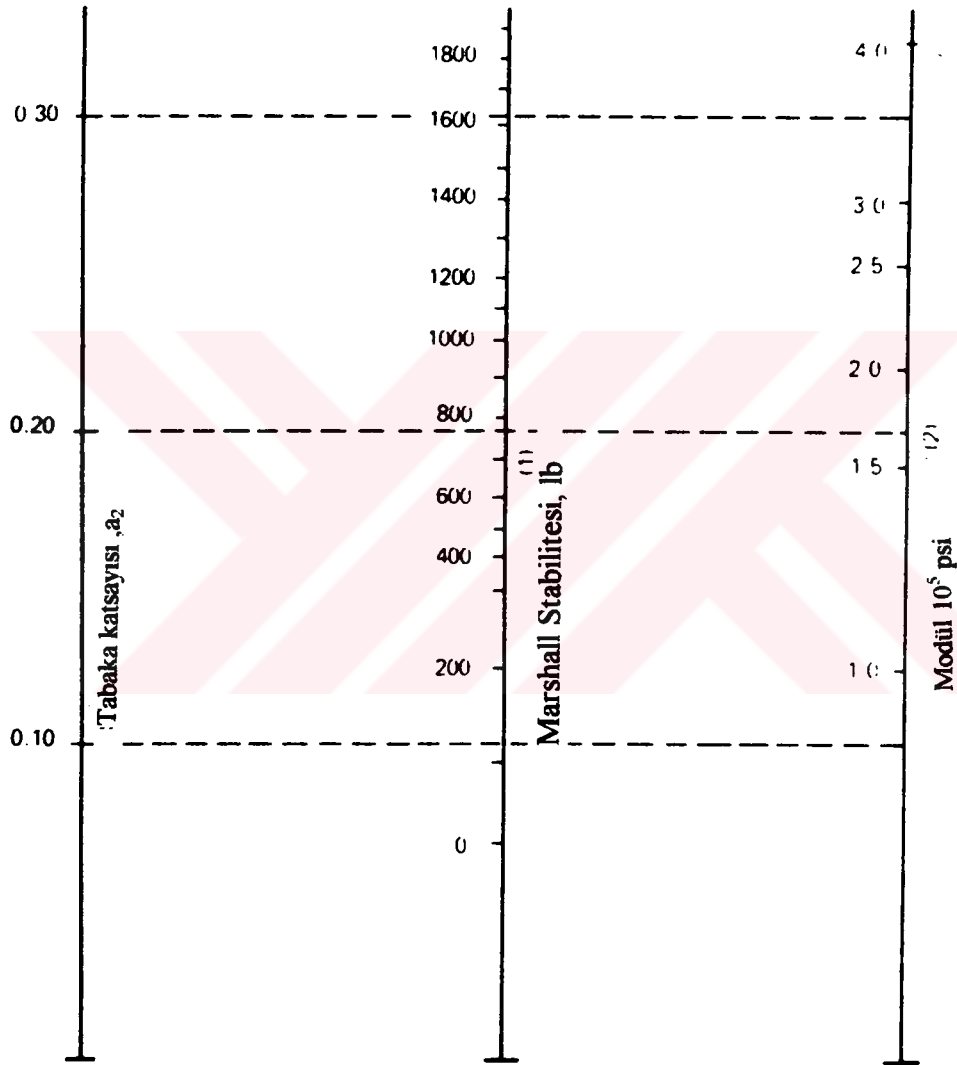
Çimentolu Temeller : Çimentolu temel tabakasının tabaka katsayısını (a_2) bulmak için elastik modül (E_{BS}) veya 7 Günlük Drenajlı Basınç Mukavemeti değeri kullanılır ve Şekil 4.5'ten yararlanılır.



1. Ölçek Illinois, Louisiana ve Texas'da elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

ŞEKİL 4.5. Çimentolu temel tabakasının tabaka katsayısının (a_2) bulunması

Bitümlü Temeller : Bitümlü temel tabakasının tabaka katsayısı (a_2) Marshall Stabilesi değeri veya elastik modül (E_{BS}) kullanılarak *Şekil 4.6*'dan bulunur.



1. Ölçek Illinois'de elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

Şekil 4.6. Bitümlü temel tabakasının tabaka katsayısının (a_2) bulunması

4.2.1.4 Üstyapının Yapısal Özellikleri – Drenaj

Esnek üstyapıların tasarımında drenaj şartları da açıkça belirtilmelidir. *Tablo 4.21*'de drenaj kalitesi düzeyiyle ilgili AASHTO 93'te yer alan bilgiler görülmektedir.

Tablo 4.21 Üstyapı tasarımı için drenaj kalitesi düzeyleri

Drenaj Kalitesi	Suyun Uzaklaştırılma Süresi
Çok iyi	2 saat
İyi	1 gün
Orta	1 hafta
Kötü	1 ay
Çok kötü	Su uzaklaşmıyor

Drenajın yüzey tabakası altındaki stabilize edilmemiş tabakalar üzerindeki etkisi her bir tabaka katsayısının (a_i) bir düzeltme faktörü (m_i) ile çarpılmasıyla hesaba katılır. AASHTO 93'te verilen “m” değerleri *Tablo 4.22*'den alınabilir.

Tablo 4.22 Esnek üstyapılarda tasfiye edilmemiş temel ve alt temel malzemeleri için önerilen “m” değerleri

Drenaj Kalitesi	Üstyapının Doygunluk Seviyesine Yakın Rutubete Maruz Kaldığı Sürenin Yıl İçindeki Yüzdesi			
	%1'den az	%1-5	%5-25	%25'ten fazla
Çok iyi	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
İyi	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Orta	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Kötü	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Çok kötü	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Üstyapı sayısını veren eşitliğin drenaj için düzeltilmiş hali aşağıdaki gibidir, asfalt tabakası geçirimsiz kabul edilmiştir.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 + \dots + a_i \cdot D_i \cdot m_i \quad (4.5)$$

“ m_i ” değeri yalnızca stabilize edilmemiş malzemelere uygulanır. Bu nedenle Tablo 4.22’deki “ m_i ” değerleri drenajın tasfiye edilmemiş temel ve alt temel tabakaları üzerindeki etkileri için kullanılır. Aşırı nem stabilize edilmemiş malzemeleri de olumsuz etkilemekle birlikte stabilize edilmemiş malzemeler üzerindeki etkisi daha fazladır.

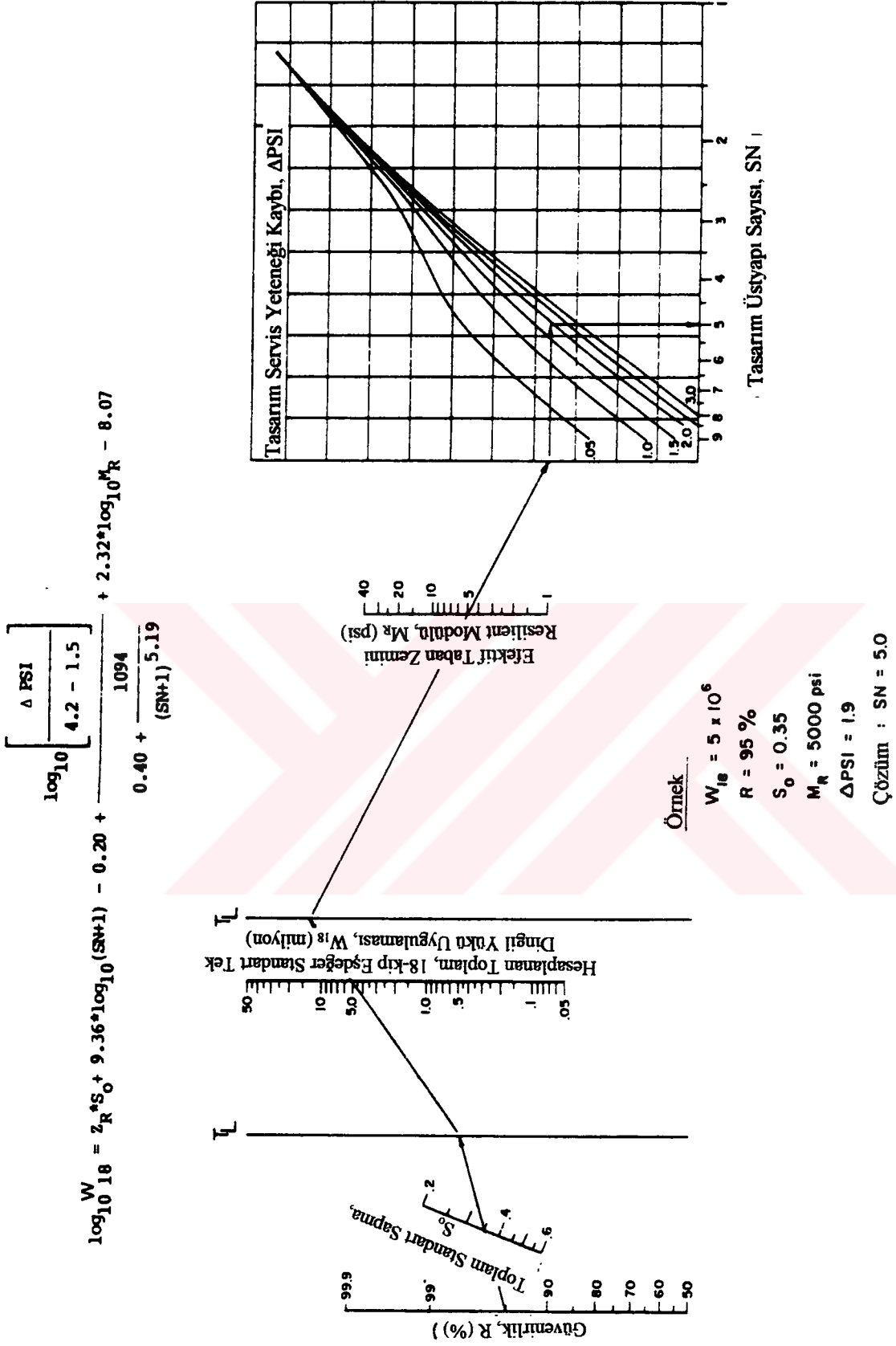
4.2.2 Gerekli Üstyapı kalınlığının Belirlenmesi

AASHTO esnek üstyapı tasarımı şimdiye kadar verilen bilgiler ve eşitlikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu eşitlikler elle, nomograflar kullanılarak veya son geliştirilen bilgisayar programlarıyla çözülebilir. Tasarım yönteminin karmaşıklığı elle çözümü sıkıcı bir işlem haline getirebilir. Nomograflar işlemi basitleştirmekle birlikte içerdikleri eskiden kalma bazı kabuller çözümlerinin elle veya bilgisayarla yapılan çözümlere göre daha yüksek hata payı içermesine neden olabilir. Bilgisayarlı yaklaşım tüm tasarım faktörlerinin kolaylıkla ele alınmasını sağlar ve eşitliklerin daha doğru olarak çözümlmesine yardımcı olur. Bununla birlikte dünya genelinde kullanımda olmaları sebebiyle nomograflara AASHTO 93’te yer verilmiştir.

Üstyapı Sayısının ve Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi

Performans periyodu süresince taşınacak toplam trafik “ $W_{8.2}$ ”, tasarım güvenilirliği “ R ”, toplam standart sapma “ S_o ”, efektif taban zemini elastisite modülü “ M_R ” ve toplam servis yeteneği kaybı “ ΔPSI ” bulunduktan sonra *Şekil 4.7*’den üstyapı sayısı bulunur.

Üstyapı formülünde “ SN ” değeri, tabaka katsayıları “ a_i ” ve drenaj katsayıları “ m_i ” yerine konarak tabaka kalınlıkları “ D_i ” hesaplanır. Bu denklemin tek bir çözümü yoktur, tabaka kalınlıkları için bu eşitliği sağlayan pek çok kombinasyon vardır. Ancak bulunan kalınlıklar *Tablo 4.23*’te verilen değerlerden küçük olamaz.

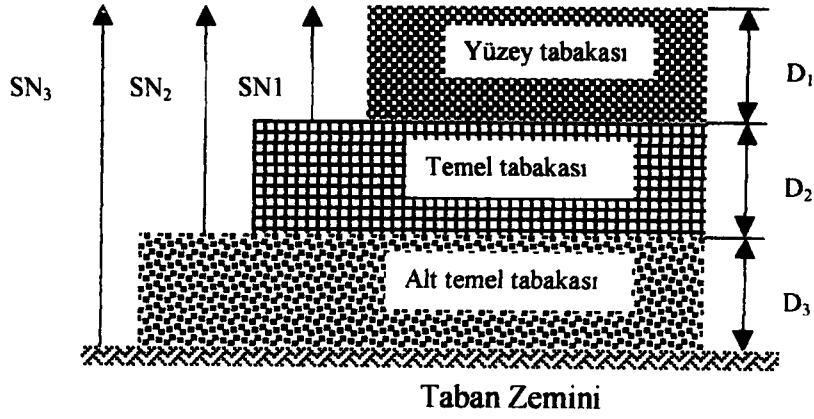


Şekil 4.7. Esnek üstyapılar için tasarım çizelgesi

Tablo 4.23 Uygulamada kullanılabilecek minimum asfalt kaplama ve temel kalınlıkları

Trafik ESDY	Minimum Tabaka Kalınlığı (in)	
	Asfalt Kaplama	Temel
50,000'den az	1 (25 mm)	4 (102 mm)
50,001 - 150,000	2 (51 mm)	4 (102 mm)
150,001 - 500,000	2.5 (64 mm)	4 (102 mm)
500,001 - 2,000,000	3 (76 mm)	6 (152 mm)
2,000,001 - 7,000,000	3.5 (89 mm)	6 (152 mm)
7,000,000'dan çok	4 (102 mm)	6 (152 mm)

Üstyapı *Şekil 4.8* için verilen şartlara göre projelendirilir. İlk önce taban zemini için daha sonra aynı şekilde temel ve alt temel tabakaları için SN değerleri hesaplanır. Farklı üstyapı sayılarıyla çalışılırken her tabaka üzerinde kabul edilebilecek maksimum kalınlıklar da bulunmuş olacaktır.



$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (4.20)$$

$$SN_1^* = a_1 \cdot D_1 \geq SN_1 \quad (4.20a)$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2} \quad (4.20b)$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2 \quad (4.20c)$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 \cdot m_3} \quad (4.20d)$$

- 1) a, D, M ve SN gerekli minimum değerlerdir.
- 2) D^* ve SN_i gerekli minimum değere eşit olması gereken gerçek değeri ifade eder.

Şekil 4.8 Tabaka analiziyle tabaka kalınlıklarının belirlenmesi

BÖLÜM 5

AMPİRİK, ANALİTİK VE ANALİTİK-AMPİRİK YÖNTEMLER KULLANILARAK ESNEK ÜSTYAPILARIN TASARIMI

Bu bölümde aynı veriler kullanılarak üç ayrı yöntemle üstyapı tasarımı yapılmıştır.

5.1 Yol Notu 29 Ampirik Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı

5.1.1 Veriler

$t = 20$ yıl (Analiz Periyodu)

$T_{\max} = 15$ yıl (Maksimum Performans Periyodu)

$W_{8.2} = 3.73 \cdot 10^6$ ESDY (15 yıl için)

$M_R = 5700$ psi

Denklem 3.7 'den $M_R = 5700$ psi için CBR değeri

CBR $\cong 4$ olarak bulunur.

5.1.2 Çözüm

Yukarıdaki verilerin ışığında Şekil 2.6'dan $W_{8.2} (15) = 3.73 \cdot 10^6$ ESDY ve CBR = 4 için alt temel kalınlığı;

$D_3 = 285$ mm

bulunur .

Yine aynı verilerin yardımıyla Şekil 2.9'dan çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasının kalınlığı;

$$D_2 = 175 \text{ mm}$$

elde edilir. Son olarak da kaplama tabakası kalınlığı;

$$D_1 = 90 \text{ mm bulunur.}$$

Buna göre toplam kalınlık;

$$D_t = D_1 + D_2 + D_3 = 90 + 175 + 285 = 550 \text{ mm}$$

olarak hesaplanır.

5.2 Shell Analitik Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı

5.2.1 Veriler

$$N = 3.73 \cdot 10^6 \text{ ESDY}$$

$$M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ CBR (5700 psi)}$$

$$w\text{-MAAT} = 4 - 12 - 20 - 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.2.2 Çözüm

Asfalt betonu kaplama, ve için çeşitli (ağırlıklı ortalama yıllık hava sıcaklığı) değerlerinden grafikler yardımıyla kaplama, granüler temel ve granüler temeli meydana getiren tabakaların kalınlıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Bu işlemler sırasında granüler temel tabakasının toplam kalınlığı her bir w-MAAT değeri için 450 mm olarak alınmıştır.

Asfalt betonu kaplama, $N = 3.73 \cdot 10^6 \text{ ESDY}$ ve $M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ CBR (5700 psi)}$ için çeşitli ağırlıklı ortalama yıllık hava sıcaklığı değerlerinden w-MAAT grafikler yardımıyla kaplama, granüler temel ve granüler temeli meydana getiren tabakaların kalınlıkları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Bu işlemler sırasında granüler temel tabakasının toplam kalınlığı her bir w-MAAT değeri için 450 mm olarak alınmıştır.

Şekil 5.1 ve 5.2' den w-MAAT = 4 °C için sırasıyla;

$$h_1 = 100 \text{ mm}, h_{2-1} = 215 \text{ mm}, h_{2-2} = 235 \text{ mm} \quad (M_R = 2.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

$$h_1 = 60 \text{ mm}, h_{2-1} = 155 \text{ mm}, h_{2-2} = 295 \text{ mm} \quad (M_R = 5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

buradan da interpolasyonla $M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ için

$$h_1^* = 76 \text{ mm}, h_{2-1}^* = 180 \text{ mm}, h_{2-2}^* = 270 \text{ mm}$$

ve toplam kalınlık;

$$h_1 + h_2 = 526 \text{ mm} ;$$

Şekil 5.3 ve 5.4' den $w\text{-MAAT} = 12^\circ\text{C}$ için sırasıyla;

$$h_1 = 115 \text{ mm}, h_{2-1} = 210 \text{ mm}, h_{2-2} = 240 \text{ mm} \quad (M_R = 2.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

$$h_1 = 65 \text{ mm}, h_{2-1} = 290 \text{ mm}, h_{2-2} = 160 \text{ mm} \quad (M_R = 5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

buradan da interpolasyonla $M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ için

$$h_1^* = 85 \text{ mm}, h_{2-1}^* = 260 \text{ mm}, h_{2-2}^* = 190 \text{ mm}$$

ve toplam kalınlık;

$$h_1 + h_2 = 535 \text{ mm} ;$$

Şekil 5.5 ve 5.6' dan $w\text{-MAAT} = 20^\circ\text{C}$ için sırasıyla;

$$h_1 = 155 \text{ mm}, h_{2-1} = 190 \text{ mm}, h_{2-2} = 260 \text{ mm} \quad (M_R = 2.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

$$h_1 = 75 \text{ mm}, h_{2-1} = 290 \text{ mm}, h_{2-2} = 160 \text{ mm} \quad (M_R = 5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

buradan da interpolasyonla $M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ için

$$h_1^* = 107 \text{ mm}, h_{2-1}^* = 250 \text{ mm}, h_{2-2}^* = 200 \text{ mm}$$

ve toplam kalınlık;

$$h_1 + h_2 = 557 \text{ mm} ;$$

Şekil 5.7 ve 5.8' den $w\text{-MAAT} = 28^\circ\text{C}$ için sırasıyla;

$$h_1 = 210 \text{ mm}, h_{2-1} = 180 \text{ mm}, h_{2-2} = 270 \text{ mm} \quad (M_R = 2.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

$$h_1 = 95 \text{ mm}, h_{2-1} = 290 \text{ mm}, h_{2-2} = 160 \text{ mm} \quad (M_R = 5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2)$$

buradan da interpolasyonla $M_R = 4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ için

$$h_1^* = 141 \text{ mm}, h_{2-1}^* = 245 \text{ mm}, h_{2-2}^* = 205 \text{ mm}$$

ve toplam kalınlık;

$h_1 + h_2 = 591 \text{ mm}$ olarak bulunmuş ve bu değerler Tablo 5.1'de topluca verilmiştir.

Tablo 5.1 Shell Analitik Tasarım Yöntemiyle Esnek Üstyapı Tasarımı**Tasarım Değişkenleri**

80 kN Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Miktarı	$3.73 \cdot 10^6$			
Ağırlıklı Yıllık Ortalama Hava Sıcaklığı w-MAAT	4	12	20	28
Zemin Modülü, M_R (N/m^2)	$4 \cdot 10^7$			

Granüler Temel Malzemeleri

<i>Malzeme Tanımı</i>	<i>Dinamik Modül, (N/m^2)</i>
Kırma taş	8
Çakıl – Kum	2

Şekillerden Bulunan Tabaka Kalınlığı**Ortalama Sıcaklık**

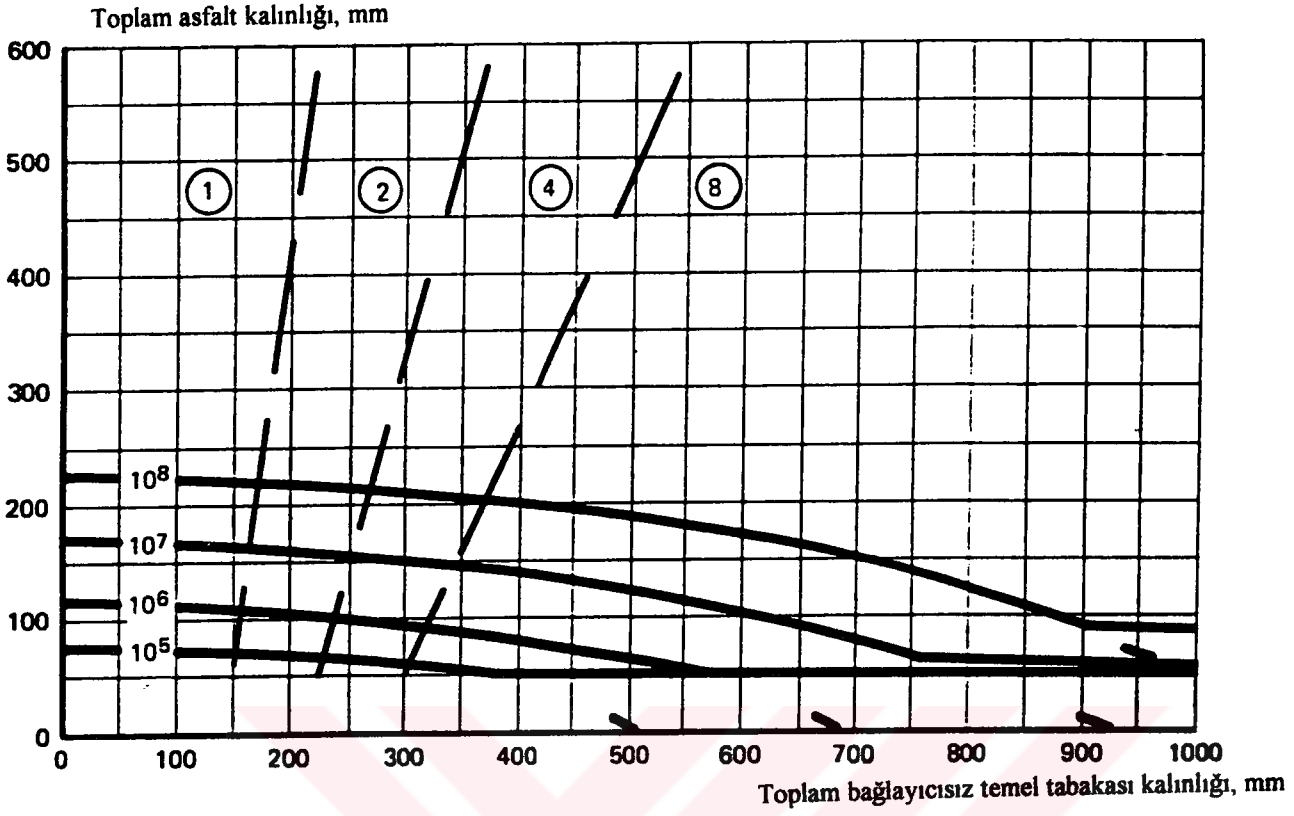
	4	12	20	28
<i>Karışım Tipi</i>	<i>Toplam Asfalt Kalınlığı</i>			
Asfalt Betonu	76	85	107	141
<i>Granüler Tabakaların Toplam Kalınlığı, h_2 (mm)</i>	450	450	450	450

Granüler Temeli Oluşturan Tabakaların Şekillerden Bulunan Kalınlıkları

Malzeme	Modül, E_2 , (N/m^2) $\cdot 10^8$	Tabaka Kalınlığı				
Kırma taş	8	h_{2-1}	295	260	250	245
Çakıl – Kum	2	h_{2-2}	155	190	200	205
Toplam Üstyapı Kalınlığı			526	535	557	591

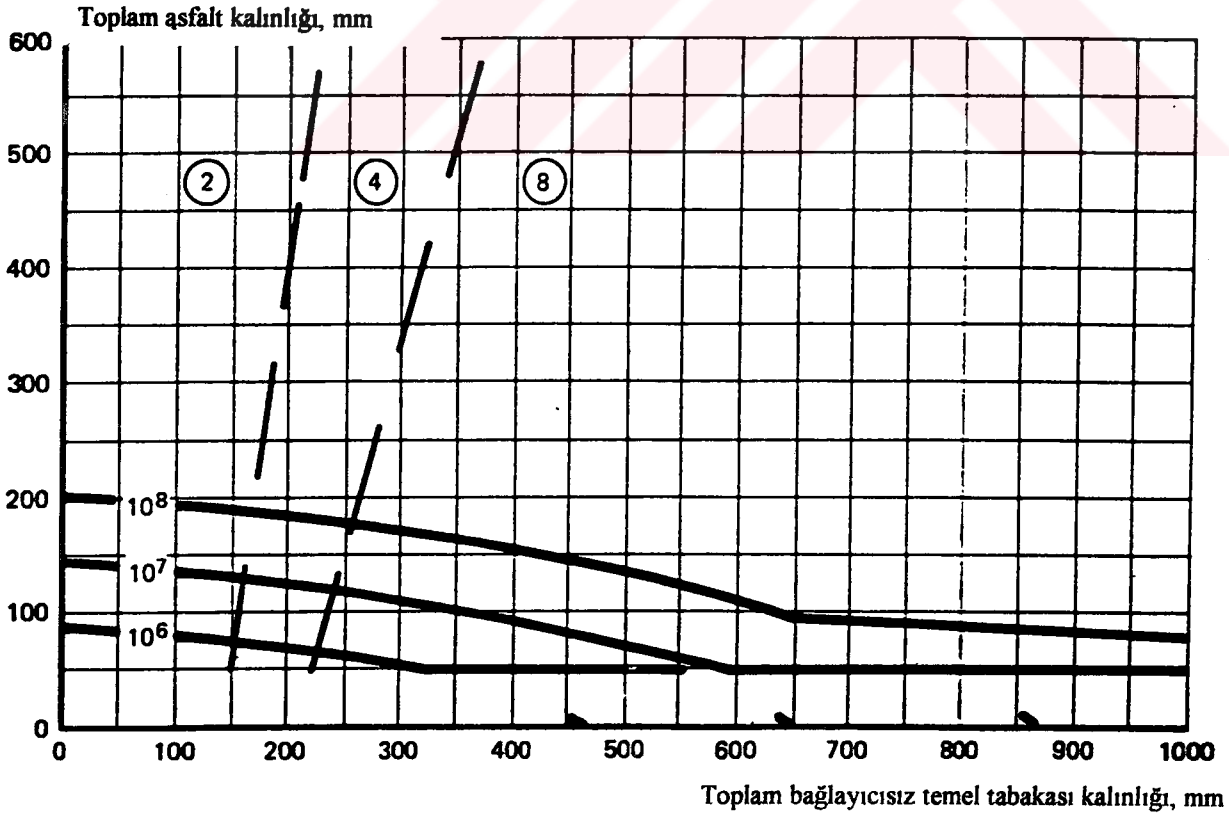
80 kN ESDY Sayısı:	Değişken	Zemin Modülü, N/m^2 :	$2.5 \cdot 10^7$	w-MAAT, °C :	4
--------------------	----------	-------------------------	------------------	--------------	---

80 kN ESDY Sayısı: Değişken	Zemin Modülü, N/m^2 : $2.5 \cdot 10^7$	w-MAAT, $^{\circ}C$: 4
-----------------------------	--	-------------------------



Şekil 5.1 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

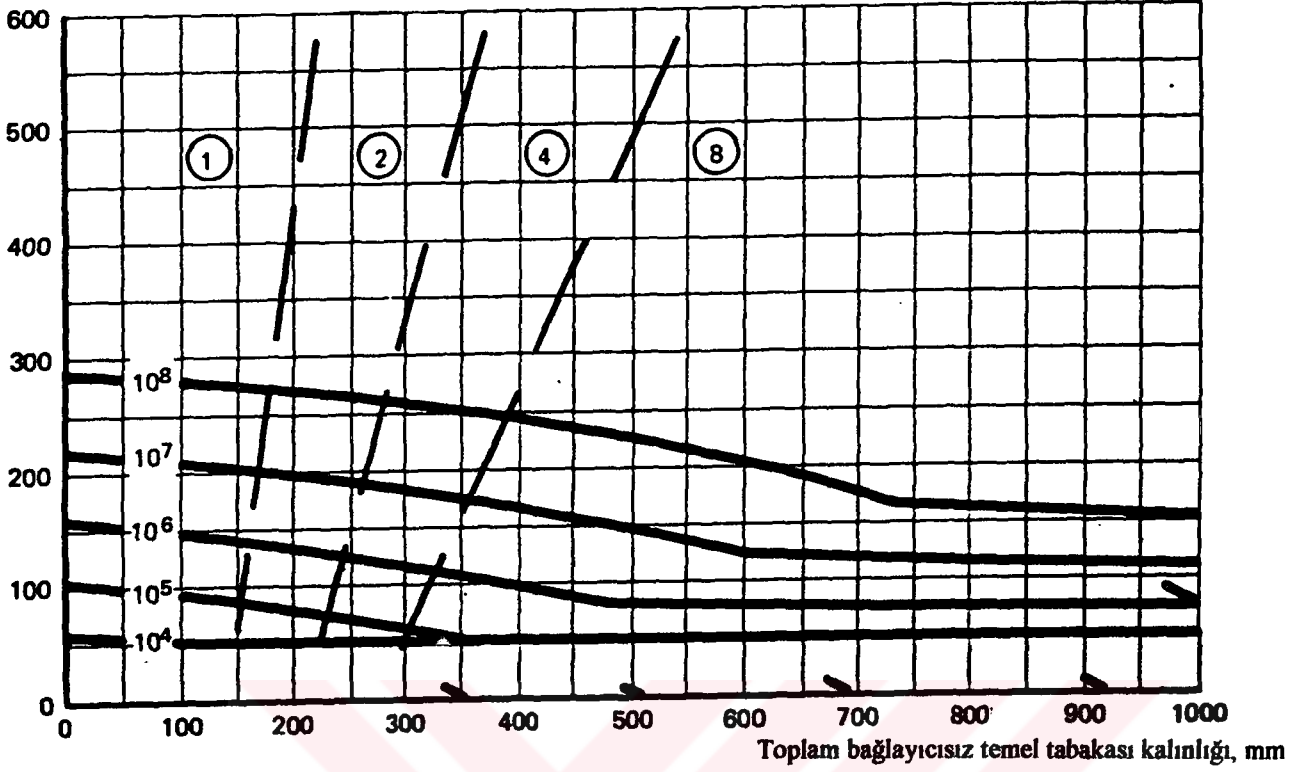
80 kN ESDY Sayısı: Değişken	Zemin Modülü, N/m^2 : $5 \cdot 10^7$	w-MAAT, $^{\circ}C$: 4
-----------------------------	--	-------------------------



Şekil 5.2 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

80 kN ESDY Sayısı: Değişken	Zemin Modülü, N/m^2 : $2.5 \cdot 10^7$	w-MAAT, $^{\circ}C$: 12
-----------------------------	--	--------------------------

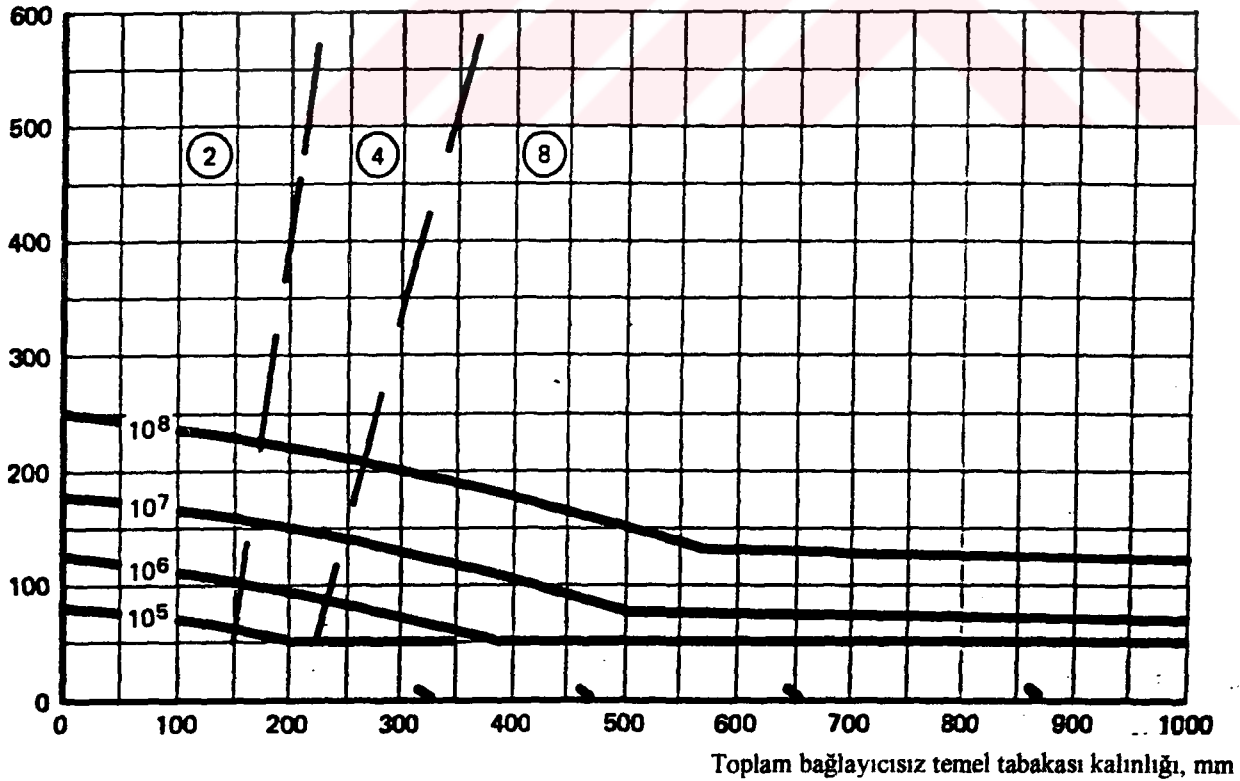
Toplam asfalt kalınlığı, mm



Şekil 5.3 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

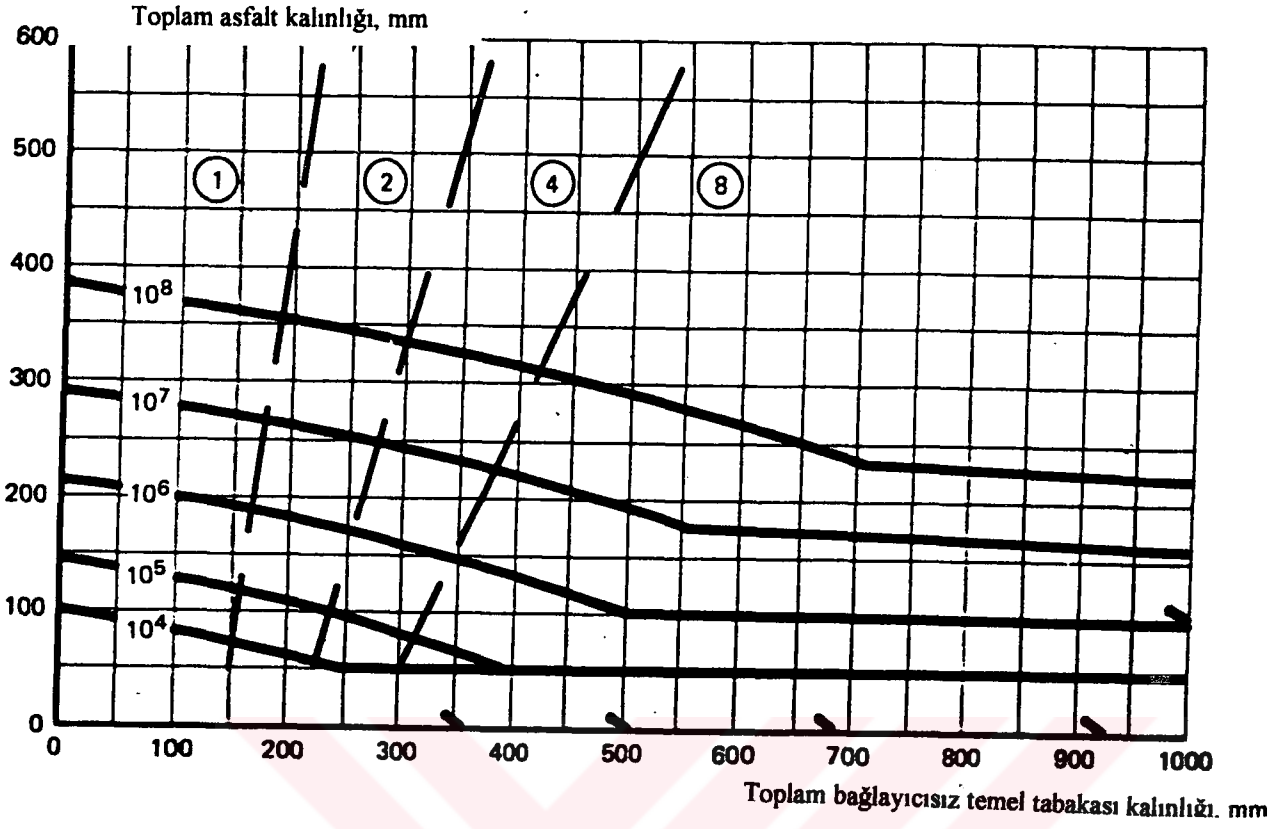
80 kN ESDY Sayısı: Değişken	Zemin Modülü, N/m^2 : $5 \cdot 10^7$	w-MAAT, $^{\circ}C$: 12
-----------------------------	--	--------------------------

Toplam asfalt kalınlığı, mm



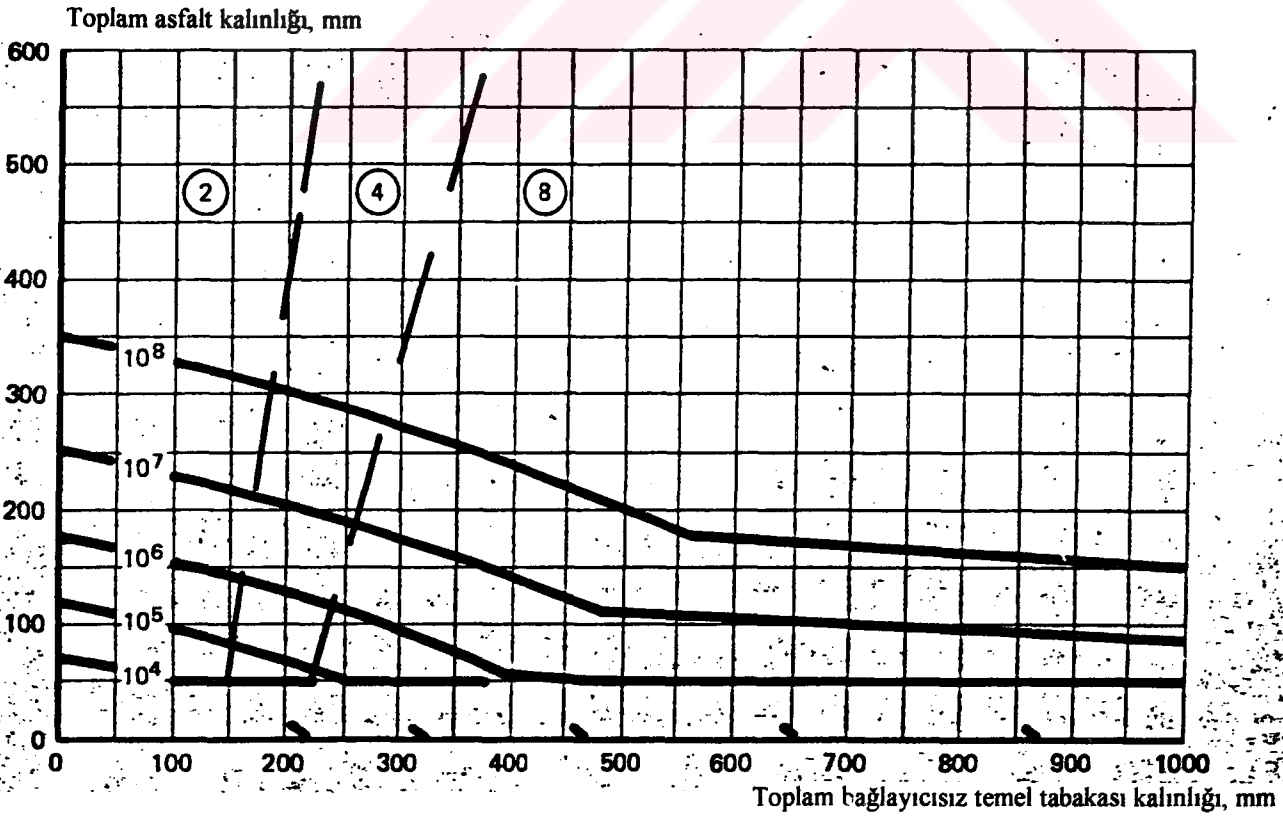
Şekil 5.4 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

80 kN ESDY Sayısı: Değişken Zemin Modülü, N/m^2 : $2.5 \cdot 10^7$ w-MAAT, $^{\circ}C$: 20



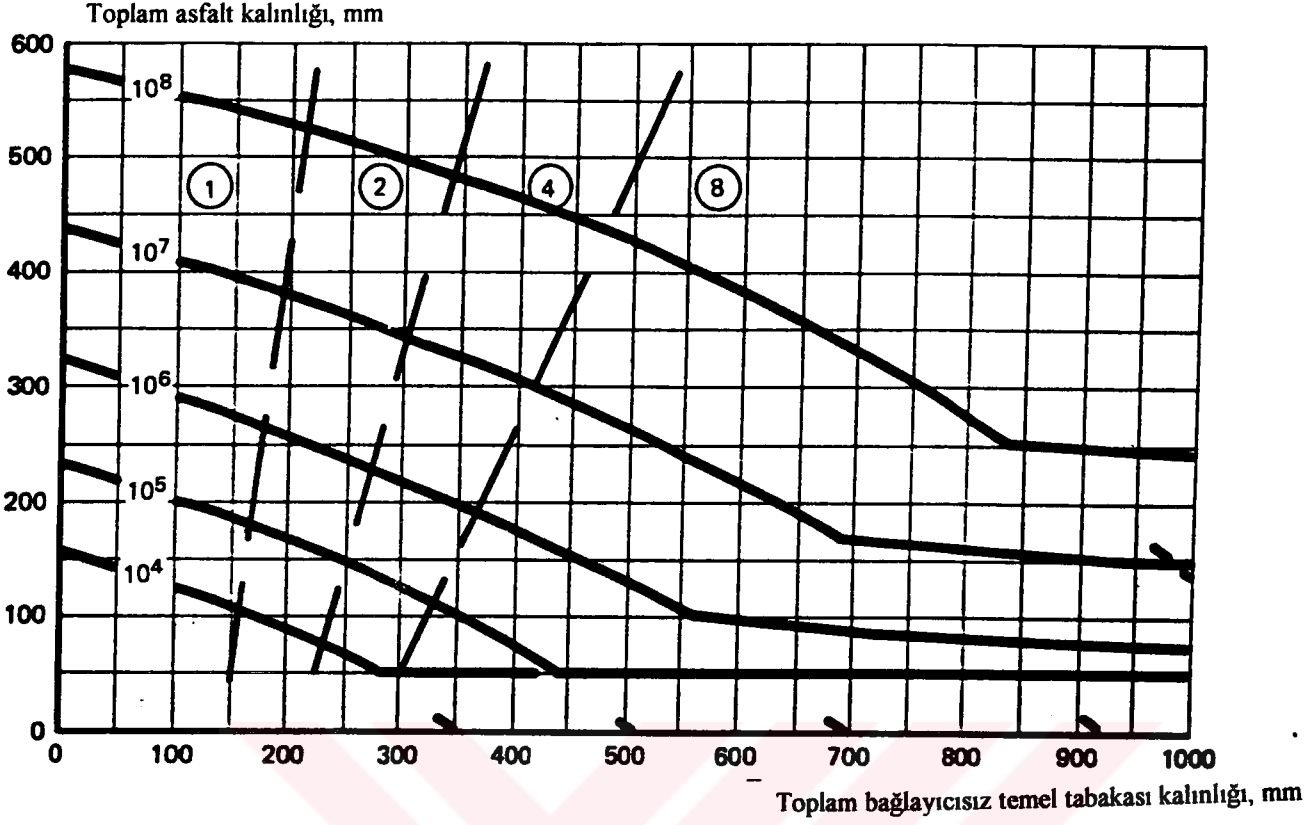
Şekil 5.5 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

80 kN ESDY Sayısı: Değişken Zemin Modülü, N/m^2 : $5 \cdot 10^7$ w-MAAT, $^{\circ}C$: 20



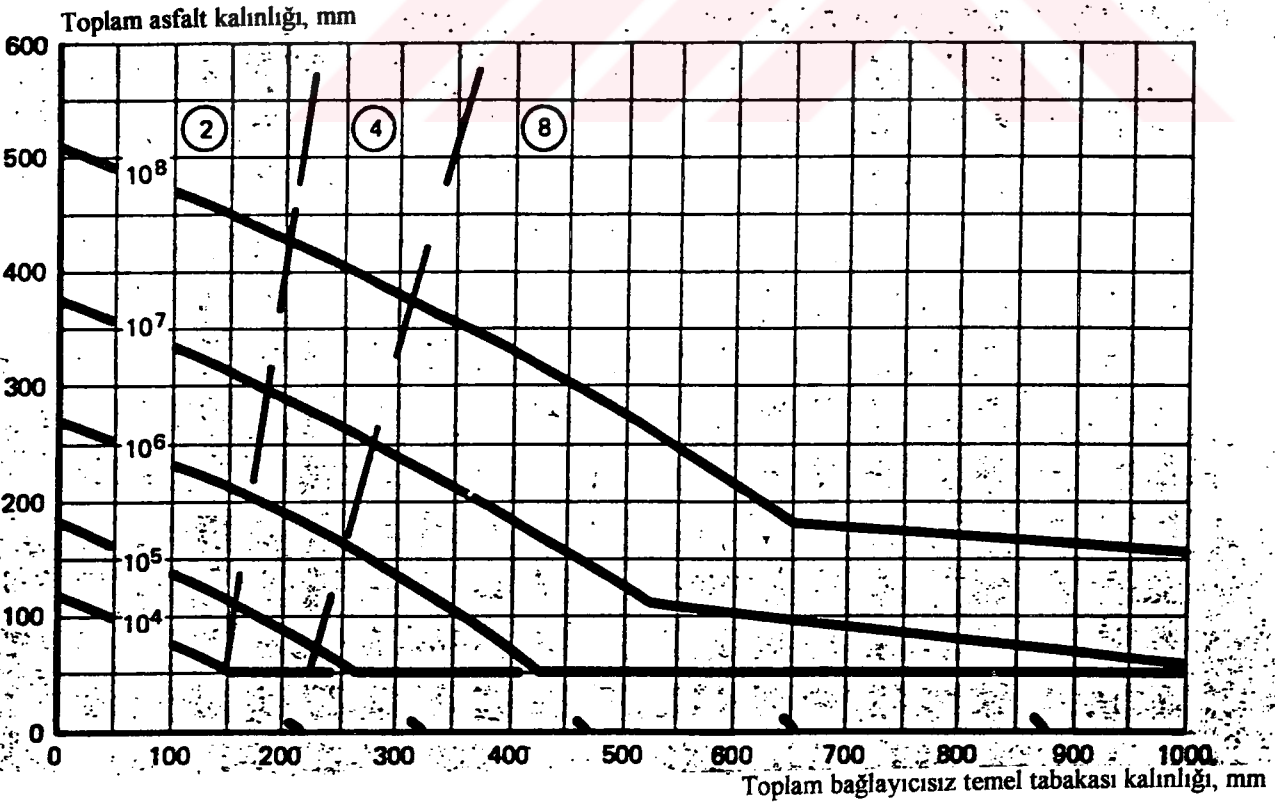
Şekil 5.6 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

80 kN ESDY Sayısı: Değişken Zemin Modülü, N/m^2 : $2.5 \cdot 10^7$ w-MAAT, $^{\circ}C$: 28



Şekil 5.7 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

80 kN ESDY Sayısı: Değişken Zemin Modülü, N/m^2 : $5 \cdot 10^7$ w-MAAT, $^{\circ}C$: 28



Şekil 5.8 Üstyapı kalınlığının çeşitli N değerleri için hesaplanması

5.3 AASHTO 93 Analitik-Ampirik Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı

5.3.1 Veriler:

6 Şeritli bölünmüş yol (3+3)

Zaman için:

$t = 20$ yıl (Analiz Periyodu)

$T_{\max} = 18$ yıl (Maksimum Performans Periyodu)

$P_o = 4.5$, $P_t = 2.5$

$\Delta PSI = P_o - P_t = 4.5 - 2.5 = 2.0$

Güvenilirlik için:

$R = \%90$ (Tablo 4.13 ve 4.14'ten)

$R_{\text{gerçek}} = R^{1/n}$

n : Yolun trafiğe açık olduğu performans periyodu sayısı

$n = 2$

$R_{\text{gerçek}} = R^{1/2} = 0.9^{1/2} = 0.95$

$S_o = 0.35$, $ZR = -1.645$

Trafik için:

$W_{8.2} = 0.5 * 10^6$ ESDY

$D_y = \%50$, $D_s = \%80$ (Tablo 4.3)

$W_{8.2} = D_y * D_s * W_{8.2}$

$= 0.5 * 0.8 * 0.5 * 10^6 = 0.2 * 10^6$ ESDY

Trafik Artış Oranı: $r = \%3$

$W_{8.2}(t) = W_{8.2} * \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right]$ (t yıl sonraki tasarım trafiği)

t (yıl)	$W_{8.2} \cdot 10^6$	$\Delta PSI_{S/DK}$
10	2.29	0.175
11	2.56	0.190
12	2.84	0.200
13	3.12	0.210
14	3.42	0.220
15	3.72	0.230
16	4.03	0.240
17	4.35	0.245
18	4.68	0.247
19	5.02	0.250
20	5.37	0.255

Malzeme için:

Taban Zemini	$W_{8.2}=5700$ psi
Asfalt Betonu	$E_{AC}=400\ 000$ psi
Granüler Temel	$E_{BS}=30\ 000$ psi
Granüler Alt Temel	$E_{SB}=14\ 000$ psi

Tabaka Katsayıları İçin:

Şekil 4.2'den	$a_1 = 0.42$
Şekil 4.3'ten	$a_2 = 0.14$
Şekil 4.4'ten	$a_3 = 0.10$

Temel ve Alt Temele Ait Drenaj Katsayıları İçin:

İyi drenaj ve %1-5 nemli süre yüzdesi

$$m_2 = 1.25$$

$$m_3 = 1.25$$

5.3.2 Çözüm

$$W_{8.2}(18) = 4.68 * 10^6 \text{ ESDY}$$

$$R=0.95$$

$$Z_R = -1.645$$

$$S_0 = 0.35$$

$$\Delta PSI = 20$$

$$M_R = 5700 \text{ psi}$$

Adım1 SN'in bulunması:

$$\log(W_{8.2}) = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log(M_R) - 8.07$$

eşitliğinden;

$$\frac{1094}{(SN+1)^{5.15}} \log \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} = \log W_{8.2} - Z_R \cdot S_0 - 9.36 \cdot \log (SN + 1) + 0.2 - 2.32 \cdot \log M_R + 8.07 - 0.4$$

bağıntısı elde edilir.

Bu bağıntı yardımıyla SN değeri bulunur. Bunun için denklemin sağ tarafındaki SN yerine tahmini bir değer konularak diğer verilerin de kullanılmasıyla sol taraftaki SN değeri bulunur. Bulunan değer sağ taraftaki SN yerine konulan değere eşit olması istenir. Sayıların eşit olmaması durumunda, bir önceki adımda denklemin sol tarafında bulunan son SN değeri denklemin sol tarafına konularak işlem tekrarlanır. Bu durum SN değerleri birbirine eşit veya çok yakın değerler alıncaya kadar devam eder.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında sağdaki SN'in yerine 4.66 koyduğumuzda;

$$SN_{sol} \cong SN_{sağ} = 4.66$$

bulunur.

Şekil 4.7'den de aynı sonuç elde edilebilir.

Adım 2

Zemin şişmesi ve don kabarmasından dolayı servis yeteneğinde oluşan kayıp nedeniyle performans periyodunda azaltma yapmak gerekir. Bunun için performans periyodundan daha küçük bir deneme periyodu seçilerek kontrol işlemi gerçekleştirilir.

$$t = 15 \text{ yıl}, \Delta PSI_{ş/D.K.} = 0.230$$

$$\Delta PSI_{TR} = 2.0 - 0.230 = 1.770, \quad SN = 4.66$$

Bu veriler denklemde yerine konularak ya da Şekil 4.7'den,

$$W_{8.2} = 3.73 \cdot 10^6 \text{ ESDY}$$

bulunur ki bu da 15 yıllık bir süre zarfında yolun maruz kalacağı toplam E.S.D.Y.'ne eşittir. Buna göre $t = 15$ yıl alınabilir.

Adım 3 Tabaka kalınlıklarının bulunması

$$W_{8.2} = 3.73 \cdot 10^6 \text{ ESDY}, \Delta PSI = 1.770, E_{BS} = 30000 \text{ psi}$$

Verilerin 4.4 nolu denklemde yerlerine konmasıyla veya Şekil 4.7'den,,

$$SN_1 = 2.53$$

$$D_{1q} = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{2.53}{0.42} = 6.02 \cong 6.1 \text{ inç} \cong 155 \text{ mm}$$

$$SN_1^* = a_1 \cdot D_{1q}^* = 0.42 \cdot 6.1 = 2.56 > 2.53$$

$E_{SB} = 14000$ psi için 4.4 nolu denklemden; $SN_2 = 3.37$ bulunur

Buradan,

$$D_2^* = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2} = \frac{0.14 \cdot 1.25}{3.37 - 2.56} = 4.62 \cong 4.7 \text{ inç} \cong 120 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} SN_2^* &= a_2 \cdot m_2 \cdot D_2^* \\ &= 0.14 \cdot 1.25 \cdot 4.70 = 0.83 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow D_3^* = \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 \cdot m_3} = \frac{4.66 - (0.42 + 0.83)}{0.10 \cdot 1.25} = 10.16 \cong 10.2 \text{ inç}$$

$$D_3^* \cong 260 \text{ mm}$$

$$\text{Üstyapının toplam kalınlığı} = D_1^* + D_2^* + D_3^* = 155 + 120 + 260 = 535 \text{ mm}$$

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Üç yöntemle yapılan tasarımların sonuçları incelendiğinde ampirik ve analitik-ampirik yöntemlerle bulunan toplam üstyapı kalınlıklarının birbirine yakın değerler olduğu Shell Analitik Tasarım Yöntemi'nde de ağırlıklı yıllık ortalama sıcaklık değerinin (w-MAAT) 28 °C'nin altında olduğu durumlar için elde edilen toplam üstyapı kalınlığının diğer yöntemlerle bulunan kalınlık değerine çok yaklaştığı görülmüştür. Bu durumda aynı verilerin kullanılması durumunda her üç yöntemin de tasarımcıyı yaklaşık olarak aynı sonuca götüreceği söylenebilir.

Bununla birlikte bu yöntemler ele alındığında Yol Notu 29 Tasarım Yöntemi'nin oldukça basit ve gerek malzeme cinsi gerekse kullanılan parametreler açısından yetersiz olduğu görülmektedir. Kullanılışının kolay ve basit olduğu göz önünde bulundurularak Yol Notu 29'un bir ön tasarım hazırlanması aşamasında kullanılması mümkündür.

Shell Analitik Tasarım Yöntemi oldukça kapsamlı ve geniş bir alana hitap eder niteliktedir. Dört farklı ağırlıklı yıllık ortalama sıcaklık değeri için (4, 12, 20, ve 28°C) yapılan hesaplamalar sonucu dört değişik üstyapı kalınlığı bulunmuştur. Belli bir bölge ve kesin veriler kullanılarak yapılacak işlemlerle daha doğru ve tatmin edici sonuçlar elde etmek mümkündür. Ancak analitik yöntemlerle malzemelerin yolda sergilediği özellik ve davranışların tam olarak yansıtılamaması, temsil edilememesi sebebiyle tasarımın hayata geçirilmesini takiben hesapta olmayan aksaklık ve problemlerle karşılaşılması ihtimali vardır.