

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARAYOLU VE HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIM
YÖNTEMLERİ, KARŞILAŞTIRMASI VE TÜRKİYE
UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çev. Müh. Eda KÖK**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı : ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2008

**KARAYOLU VE HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIM
YÖNTEMLERİ, KARŞILAŞTIRMASI VE TÜRKİYE
UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çev. Müh. Eda KÖK
501031406**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Emine AĞAR (İ.T.Ü)
Dr. M.Sinan YARDIM (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, esnek ve rijit üstyapılar için ayrı ayrı anlatılmıştır. Türkiye’de uygulanan üstyapı tasarım örneklerine yer verilmiş ve karayolu ile havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerinin, tasarım parametreleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

Üstyapı tasarım yöntemleri ile ilgili çeşitli kaynaklardan yararlanılmıştır. Karayolu için, Ulaştırma Bakanlığı’na bağlı Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), havaalanı için, Ulaştırma Bakanlığı’na bağlı Demiryolları Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı (DLH) Genel Müdürlüğü Proje Etüt Dairesi’nden Türkiye’de ki üstyapı uygulamaları ile ilgili örnekler alınmıştır. Çalışmanın altıncı bölümünde, “Bursa-Eskişehir Devlet yolu İnegöl-Bozüyük arası esnek üstyapı projesi” ve “Elazığ Havaalanı üstyapı projesi”nin, üstyapı tasarım verileri ve üstyapı kalınlıklarına yer verilmiştir.

Yedinci bölümde, karayolu ve havaalanı hem esnek hem rijit üstyapı tasarımları yapılarak, karayolu ile havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerinin, tasarım parametreleri açısından karşılaştırılması yapılmış ve son bölümde sonuçlar irdelenmiştir.

Değerli hocam, sayın Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM’ a destek ve tavsiyelerinden dolayı, şükranlarımı sunarım. Ayrıca, çalışmada destek veren, DLH Genel Müdürlüğü Proje Etüt Dairesi personeline, sevgili kardeşlerim Ela KÖK ve Onur KÖK’ e teşekkürü borç bilirim.

HAZİRAN 2008

Çev. Müh. Eda KÖK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI TASARIMI	3
2.1 Ampirik Yöntemler.....	3
2.1.1 AASTHO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	4
2.2 Ampirik-Analitik Yöntemler.....	21
2.2.1 AASHTO Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemleri.....	22
2.2.1.1 AASHTO 1986 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	22
2.2.1.2 AASHTO 1993 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	22
2.2.1.3 AASHTO 2002 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	33
2.2.2 Asfalt Enstitüsü Yöntemi.....	33
2.3 Analitik Yöntemler.....	38
2.3.1 Shell Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	39
3. KARAYOLU RİJİT ÜSTYAPI TASARIMI	44
3.1 Ampirik Yöntemler.....	46
3.1.1 AASHTO 1972 Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	46
3.1.2 Portland Çimentosu Birliği Yöntemi (1966).....	54
3.2 Ampirik-Analitik Yöntemler.....	59
3.2.1 AASHTO 1993 Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	59
3.2.2 Portland Çimento Birliği Yöntemi(1984).....	65
4. HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIMI	74
4.1 Uçakların Tasarım ile İlgili Özellikleri.....	76
4.2 Ampirik Yöntemler.....	77
4.2.1 Mühendisler Kurulu Yöntemi (CBR).....	77
4.2.2 Federal Havacılık İdaresi (FAA) Yöntemi.....	90
4.3 Analitik Yöntemler.....	101
4.3.1 Asfalt Enstitüsü Yöntemi.....	101
4.4 ACN/PCN Yöntemi.....	117
4.4.1 ACN-PCN Yönteminin Esası.....	117
4.4.2 ACN' ların Belirlenmesi	118

5. HAVAALANI RİJİT ÜSTYAPI TASARIMI	124
5.1 Ampirik Yöntemler.....	125
5.1.1 Mühendisler Kurulu Yöntemi.....	125
5.1.2 Federal Havacılık İdaresi (FAA) Yöntemi.....	130
5.2 Ampirik Analitik Yöntemler.....	138
5.2.1 Portland Çimento Birliği Yöntemi.....	138
5.3 Rijit Havaalanı Üstyapılarında Diğer Yapım Esasları.....	145
5.3.1 Temel Tabakası.....	145
5.3.2 Kompaksiyon Gereksinimi.....	145
5.3.3 Derz ve Donatı Gereksinimi.....	146
6. TÜRKİYE’ DE KARAYOLU VE HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIMI UYGULAMALARI	148
7. KARAYOLU VE HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	151
7.1 AASHTO 1993 Ampirik-Analitik Tasarım Yöntemi ile Karayolu Üstyapı Tasarımı.....	151
7.1.1 Esnek Üstyapı Tasarımı.....	151
7.1.2 Rijit Üstyapı Tasarımı.....	156
7.2 FAA Ampirik Tasarım Yöntemi ile Havaalanı Üstyapı Tasarımı.....	158
7.2.1 Esnek Üstyapı Tasarımı.....	159
7.2.2 Rijit Üstyapı Tasarımı.....	159
7.3 Karayolu ve Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Tasarım Parametreleri Esas Alınarak Karşılaştırılması.....	162
7.3.1 Tasarım yükü açısından karşılaştırma	162
7.3.2 Trafik hacmi (yük tekrar sayısı) açısından karşılaştırma	162
7.3.3 İklim ve Çevresel Etkiler Açısından Karşılaştırma.....	163
7.3.4 Taban Zemini Açısından Karşılaştırma.....	163
7.3.5 Üstyapı Malzemelerinin Özellikleri Açısından Karşılaştırma.....	163
7.3.6 Trafik Alanına Bağlı Üstyapı Kalınlığı Açısından Karşılaştırma	164
7.4 Karayolu ve Havaalanı Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Tasarım Parametreleri Esas Alınarak Karşılaştırılması.....	164
7.4.1 Taban Zemini Açısından Karşılaştırma.....	164
7.4.2 Üstyapı Malzemelerinin Özellikleri Açısından Karşılaştırma.....	165
7.4.3 Pompaj Olayı Açısından Karşılaştırma.....	165
7.4.4 Üstyapı Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karşılaştırma.....	165
8. SONUÇLAR	166
KAYNAKLAR	168
EKLER	171
ÖZGEÇMİŞ	203

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerika Devlet Karayolları Görevlileri Birliği)
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
FAA	: Federal Aviation Administration (Federal Havacılık İdaresi)
ACN	: Aircraft Classification Number (Uçak Sınıflandırma Numarası)
PCN	: Pavement Classification Number (Üstyapı Sınıflandırma Numarası)
ICAO	: International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu)
PCA	: Portland Cement Association (Portland Çimentosu Birliği)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Şerit Dağıtma Faktörü (D_s)..... 9
Tablo 2.2	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF)..... 10
Tablo 2.3	Bölge Faktörü Değerleri 12
Tablo 2.4	AASHTO' ya ait Tabaka Katsayıları..... 13
Tablo 2.5	AASHTO 1972 Tasarım Yöntemi İçin Örnek Problem 20
Tablo 2.6	Tavsiye Edilen Güvenilirlik Değerleri (AASHTO 1993)..... 27
Tablo 2.7	Tavsiye Edilen Drenaj Katsayıları (AASHTO 1986)..... 27
Tablo 2.8	Trafik Sınıflandırması (Asfalt Enstitüsü)..... 35
Tablo 2.9	Asfalt Emülsiyonu Temel Tabakası Üzerindeki Minimum Asfalt Aşınma Tabakası (Asfalt Enstitüsü)..... 37
Tablo 3.1	Taban Zemini Reaksiyon Modülü Değerleri 51
Tablo 3.2	Gerilme Oranları ve İzin Verilebilir Yük Tekrar Sayısı (Portland Çimentosu Birliği)..... 54
Tablo 3.3	Trafik Artışının Yıllık Oranları ve Koruma Faktörleri İle Uyumu. 56
Tablo 3.4	Tavsiye Edilen Yük Transferi Katsayıları..... 61
Tablo 3.5	Tavsiye Edilen Drenaj Katsayıları..... 61
Tablo 3.6	Beton Banketsiz Kaplamalarda Beton Plağın Eşdeğer Gerilmesi (PCA)..... 69
Tablo 3.7	Beton Banketli Kaplamalarda Beton Plağın Eşdeğer Gerilmesi (PCA)..... 69
Tablo 3.8	Alt temel Tabakası Üzerindeki k Değeri PCA)..... 70
Tablo 4.1	Alt temel Gereksinimleri 84
Tablo 4.2	Temel Tabakası için Tasarım CBR'ı..... 84
Tablo 4.3	Kaplama ve Temel Kalınlık Tasarım Ölçütleri..... 86
Tablo 4.4	Malzeme Özellikleri..... 88
Tablo 4.5	Kompaksiyon Derinliği..... 89
Tablo 4.6	Tasarım Verileri..... 89
Tablo 4.7	Esnek Üstyapılar için FAA Taban Zemini Sınıfları ^a 91
Tablo 4.8	CBR – FAA Zemin Sınıf Benzerlikleri..... 92
Tablo 4.9	Üstyapı Malzemelerinde FAA Tanımı ^a 92
Tablo 4.10	Tasarım Uçağına Dönüşüm Katsayıları (FAA)..... 93
Tablo 4.11	Temel ve Alt temel Kalınlık Yüzdelerinin Artışları..... 97
Tablo 4.12	Sınırlı Gerilme Deformasyon Ölçütü..... 105
Tablo 4.13	Sınırlı Taban Zemini Gerilme Kriteri..... 107
Tablo 5.1	Tasarım Örneği..... 129

Tablo 5.2	Eşdeğer Kalkışları Hesaplamak için Federal Havacılık İdaresi Yöntemi.....	136
Tablo 5.3	Federal Havacılık İdaresi, Kopma Modülüne Uygulanacak Güvenlik Faktörleri.....	137
Tablo 5.4	Gerilim Oranları ve Olası Tekrarlanan Yükler.....	142
Tablo 5.5	Çeşitli Uçaklar için Tekrarlanan Yük Faktörleri.....	143
Tablo 5.6	Karmaşık Trafik için Hesap Örnekleri	144
Tablo 5.7	Derz Yerleri.....	147

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı (AASHTO 1972)..... 11
Şekil 2.2	Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (Utah State Highway Department)..... 14
Şekil 2.3	Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (NCHRP 128)..... 15
Şekil 2.4	AASHTO Tabaka Katsayıları Nomografi (a) a ₁ Kaplama tabakası parametreleri (b) a ₃ granüler alt temel (c) a ₂ bitümlü temel (d) a ₂ granüler temel (e) a ₂ çimento-stabilize temel..... 17
Şekil 2.5	Asfalt Betonu Kaplamalı Yollar için Projelendirme Abağı (AASHTO 1993)..... 24
Şekil 2.6	Taban Zemininin Şişmesinden Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_{DK}) için Grafik..... 29
Şekil 2.7	Donma Kabarmasından Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_{DK}) için Grafik..... 30
Şekil 2.8	Tabaka Analizi İle Tabaka kalınlıklarının Belirlenmesi..... 31
Şekil 2.9	Tam Derinlikli Asfalt Üstyapı (Asfalt Enstitüsü)..... 35
Şekil 2.10	Tip I, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)..... 36
Şekil 2.11	Tip II, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)..... 36
Şekil 2.12	Tip III, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)..... 36
Şekil 2.13	15 cm (taneli) Temel Tabakası (Asfalt Enstitüsü)..... 37
Şekil 2.14	30 cm (taneli) Temel Tabakası (Asfalt Enstitüsü)..... 37
Şekil 2.15	Üstyapı Kalınlığının Çeşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması, Zemin Modülü : $2,5 \cdot 10^7$ - MAAT : 12^0C 42
Şekil 2.16	Üstyapı Kalınlığının Çeşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması, Zemin Modülü : $5,0 \cdot 10^7$ - MAAT : 12^0C 43
Şekil 2.17	Üstyapı Kalınlığının Çeşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması, Zemin Modülü : $2,5 \cdot 10^7$ - MAAT : 20^0C 43
Şekil 3.1	Rijit Üstyapılara Ait Projelendirme Abağı $p_t = 2.0$ 48
Şekil 3.2	Rijit Üstyapılara Ait Projelendirme Abağı $p_t = 2.5$ 49
Şekil 3.3	Eğilme Direncinin Saptanması..... 52
Şekil 3.4	CBR ile Taban Reaksiyon Modülü (k) Arasındaki Bağlantıyı Veren Eğri..... 53
Şekil 3.5	Tek Dingil İçin Beton Üstyapıdaki Gerilmeler (PCA)..... 57
Şekil 3.6	Tandem Dingil İçin Beton Üstyapıdaki Gerilmeler (PCA)..... 58
Şekil 3.7	Her Girdi Değişkeni için Ortalama Değerleri Kullanarak Hazırlanmış Rijit Kaplama Tasarım Çizelgesi (I)..... 63
Şekil 3.8	Her Girdi Değişkeni için Ortalama Değerleri Kullanarak Hazırlanmış Rijit Kaplama Tasarım Çizelgesi (II)..... 64
Şekil 3.9	Yorulma Analizi İçin Kritik Yükleme Pozisyonu (PCA)..... 65
Şekil 3.10	Erozyon Analizi için Kritik Yükleme (PCA)..... 66
Şekil 3.11	Yorulma Analizi İçin Verilen Yük Tekrar Sayısı (PCA)..... 70

Şekil 3.12	Erozyon Analizi için İzin Verilen Tekrarlı Yük Sayısı – Beton Kaplamasız Banketli Üstyapı (PCA).....	72
Şekil 3.13	Erozyon Analizi için İzin Verilen Tekrarlı Yük Sayısı – Beton Kaplamalı Banketli Üstyapı (PCA).....	73
Şekil 4.1	İniş Takımı Tekerlek Düzeni.....	76
Şekil 4.2	Orijinal Havaalanı Tasarım Eğrileri.....	79
Şekil 4.3	Trafik Alanları.....	81
Şekil 4.4	Tek Tekerlek, Hafif Yüklü Üstyapı İçin Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri.....	83
Şekil 4.5	Çift Tekerlek Orta Yüklü Üstyapı için Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri, 37 inç boşluk, $A_c= 267 \text{ in}^2$	85
Şekil 4.6	Çift-tandem, Ağır Yük Üstyapısı İçin Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri, 37-62-37 inç Boşluklu. $A_c= 267 \text{ in}^2$	87
Şekil 4.7	Federal Havacılık Yönetimi, Tek Tekerlekli Uçaklar İçin Tasarım Eğrileri.....	94
Şekil 4.8	Çift Tekerlekli Uçaklar İçin Federal Havacılık Yöntemi Tasarım Eğrileri.....	95
Şekil 4.9	Çift Tandem Tekerlekli Uçaklar İçin Federal Havacılık Yönetimi Tasarım Eğrileri.....	96
Şekil 4.10	Minimum Temel Tabakası Kalınlığı.....	97
Şekil 4.11	DC-10-10 İçin Federal Havacılık Yöntemi Tasarım Eğrileri.....	98
Şekil 4.12	Federal Havacılık Bölümü Tasarım Eğrileri – Hafif Uçaklar.....	100
Şekil 4.13	Yorulma Kalınlığı İçin Kalınlık Ayarlama Faktörleri.....	105
Şekil 4.14	Etkili Üstyapı Tasarım Sıcaklığı.....	106
Şekil 4.15	Etkili Üstyapı Asfalt-Beton Modülü.....	107
Şekil 4.16	T_A Tasarım Eğrisi – Yorulma Ölçütü (Asfalt Enstitüsü).....	108
Şekil 4.17	T_A Tasarım Eğrileri – Deformasyon Kriteri (Asfalt Enstitüsü).....	111
Şekil 4.18	Tipik Uçak Eşdeğerlik Grafiği. (Asfalt Enstitüsü); $T_A= 10 \text{ inç}$ ve $T_A= 30 \text{ inç}$	116
Şekil 5.1	Hafif Yük için Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri (Mühendisler Kurulu).....	125
Şekil 5.2	Orta Ağırlıkta Yük için Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri.....	126
Şekil 5.3	Ağır Yük için Rijit Kaplama Tasarım Eğrileri.....	127
Şekil 5.4	Donma İndeksi ile Don Penetrasyon Girişi Arasındaki İlişki (Mühendisler Kurulu).....	127
Şekil 5.5	Sınırlı Don Penetrasyonu Durumu için Temel Tabakası Kalınlığı.....	128
Şekil 5.6	İndirgenmiş-Dayanım için Taban Zemini Reaksiyon Modülü Eğrileri.....	129
Şekil 5.7	Stabilize Edilmiş Temel Tabakasının Taban Zemini Reaksiyon Modülüne Etkisi.....	131
Şekil 5.8	Alt temel kalınlığının, Taban Reaksiyon Modülü Üzerindeki Etkisi..	132
Şekil 5.9	Tek-Tekerlek Uçaklar için Rijit Üstyapı Tasarım Abağı (FAA).....	133
Şekil 5.10	Çift Tekerlek Uçaklar için Rijit Üstyapı Tasarım Abağı (FAA).....	134
Şekil 5.11	Çift-Tandem Uçaklar için Rijit Üstyapı Tasarım Abağı (FAA).....	135
Şekil 5.12	DC9, Çift Tekerlek ve 24 inç İçin Rijit Kaplama Tasarım Eğrileri (Portland Çimento Birliği).....	141
Şekil 5.13	Boeing 727, Çift Tekerlek ve 34 İnç İçin Rijit Kaplama Tasarım Eğrileri (Portland Çimento Birliği).....	142

KARAYOLU VE HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ, KARŞILAŞTIRMASI VE TÜRKİYE UYGULAMALARI

ÖZET

Karayolu ve Havaalanı üstyapılarının tasarımı; tasarım ömrü boyunca tahmin edilen trafik yükleri ve çevre koşulları için üstyapı tabaka kalınlıklarının hesabı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada; karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında kullanılan yöntemlerin esasları açıklanmış, üstyapı tasarım parametreleri açısından karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımı yöntemlerinin, esnek ve rijit üstyapı için karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca Türkiye’de ki uygulamalar ile ilgili bilgi verilmiş ve örnekler sunulmuştur.

Birinci bölümde tasarım yöntemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve çalışmanın kapsamı açıklanmıştır.

İkinci ve üçüncü bölümlerde karayolu üstyapı tasarımı sırasıyla esnek ve rijit üstyapı için, ampirik, ampirik-analitik ve analitik yöntemler başlıkları altında açıklanmıştır. İkinci bölümde AASHTO, Asfalt Enstitüsü ve SHELL tarafından geliştirilen esnek üstyapı tasarım yöntemlerinin esasları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise AASHTO ve PCA rijit üstyapı tasarım yöntemlerinin esasları verilmiştir.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde havaalanı üstyapı tasarım esasları sırasıyla esnek ve rijit üstyapı için, ampirik ve analitik yöntemler başlıkları altında açıklanmıştır. Esnek üstyapı için; Mühendisler Kurulu, FAA, Asfalt Enstitüsü yöntemleri ile ACN/PCN yöntemi, rijit üstyapı için ise, FAA ve PCA yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Altıncı bölümde Türkiye’de üstyapı uygulamaları ile ilgili genel bilgi verilmiş ve örnekler sunulmuştur.

Yedinci bölümde, Türkiye’deki üstyapı uygulamalarına ait örneklerin verileri ile karayolu üstyapı tasarımı için AASHTO 1993 tasarım yöntemi ve havaalanı üstyapı tasarımı için FAA tasarım yöntemi kullanılarak esnek ve rijit üstyapı tasarımları yapılmış ve karayolu ile havaalanı tasarım yöntemleri, bu iki yöntem esas alınarak, tasarım parametreleri açısından karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise, çalışmada açıklanan ve karşılaştırması yapılan yöntemler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

DESIGN OF HIGHWAY AND AIRPORT PAVEMENTS, DIFFERENCES AND APPLICATIONS IN TURKEY

SUMMARY

Highway and Airport pavements design principally based on choosing layer thickness and material properties for traffic loads and environmental conditions during the design life of pavement.

In this study; highway and airport pavement design methods are explained and differences between highway and airport design concepts for pavement design parameters, both flexible and rigid pavements are displayed. Also, there is an introduction and examples about applications in Turkey.

In Chapter 1, there is an introduction for methods used for the pavement design and development of design and discussion about content of this study.

In Chapter 2 and 3 Highway pavement design methods are explained for both flexible and rigid pavements, under the title ampirical and analytical methods. In the 2nd chapter flexible pavements methods developed by AASHTO, Asphalt Institute and SHEEL and in the 3rd Chapter AASHTO and PCA rigid pavement methods are given. Also, Chapter 3 includes joints and reinforcement requirements for rigid pavements.

In chapter 4 and 5 Airport pavement design methods are explained for both flexible and rigid pavements, under the title ampirical and analytical methods. Corps of Engineers, FAA, Asphalt Institute and ACN/PCN methods for flexible pavements, FAA and PCA methods for rigid pavements are given.

Chapter 6 includes general information about pavement design aplicated in Turkey and examples of applications are given.

In chapter 7, pavements layer thickness are calculated according to FAA and AASHTO 1993 pavement design methods explained in this study. Highway and Airport pavement design are compared, according to design parameters for both flexible and rigid pavement.

In the last 8. chapter there's a conclusion that pavement design method explained in this study and compared with applications.

1. GİRİŞ

Karayolu ve Havaalanı üstyapıları esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç farklı tipte tasarlanabilmektedir. Esnek üstyapı genel olarak asfalt betonu kaplama, temel ve alt temel tabakalarını içermektedir. Rijit üstyapı ise portland çimentosundan yapılan beton plak ile temel tabakasından meydana gelmektedir.

II. Dünya savaşı sırasında havaalanı ve karayolu üstyapı tasarımı konusunda büyük gelişmeler sağlanmış ve üstyapı kalınlıklarının hesabı için CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) yöntemi ortaya konmuştur. ABD’de önceleri Maryland, sonra WASHO ve en sonunda 1960 ile 1970 yılları arasında AASHTO (Amerika Devlet Karayolları Görevlileri Birliği) yol deneyleri ile yol üstyapısı tasarım yöntemleri ve Mühendisler Kurulu (Corps of Engineers) ve PCA (Portland Çimentosu Birliği) tarafından da havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri geliştirilmiştir ve bu yöntemler zaman içinde bugünkü halini almıştır. Ayrıca SHELL, Asfalt Enstitüsü, FAA (Federal Havacılık İdaresi), vb kurumların çalışmaları da üstyapı tasarım yöntemlerinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur.

Havaalanı ve karayolu üstyapılarının tasarımındaki genel prensipler benzerdir. Bunun yanında, tasarım parametreleri ve sonuçları bakımından aralarında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri ayrı ayrı incelenerek, tasarım parametreleri ve sonuçları açısından havaalanı ve karayolu üstyapı tasarım yöntemlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Karayolu ve havaalanı üstyapılarının tasarımı, karayolu için yol üstyapısının, havaalanı için ise pist, apron, taksiyolu gibi kritik alanların üstyapı tipinin seçimi, tabaka kalınlıklarının hesaplanması ve kullanılacak malzemelerin seçiminin yapılması ile ilgili esasları kapsamaktadır. Üstyapı tasarım yöntemleri; ampirik yöntemler, analitik yöntemler ve analitik-ampirik yöntemler olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.

Ampirik yöntemler; yapılan deney sonuçlarını esas alan, deney koşullarına bağlı olan geleneksel tasarım yöntemleridir. Bu yöntemler, uygulanması uzun zaman alan ve pahalı olan yöntemlerdir.

Ampirik analitik yöntemler ; analitik yöntemler ile modellenemeyen bazı faktörlerin, ampirik bağıntılarla ve performans gözlemleriyle kalibrasyonunun sağlanması amacıyla geliştirilmiştir.

Analitik yöntemler ise; üstyapı tabaka kalınlıklarının, üstyapı malzemelerinin mekanik özellikleri, trafik yükleri ve çevre koşulları dikkate alınarak geliştirilen matematiksel modeller ile bunlardan türetilen abaklar ve bilgisayar programları yardımıyla hesaplanması esasına dayanmaktadır.

Ülkemizde, karayolu üstyapıları için Ulaştırma Bakanlığı'na bağlı Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından AASHTO 1993 analitik-ampirik tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Havaalanı üstyapıları için, Nato Enformasyon Dairesi Başkanlığı, Hava Kuvvetleri Komutanlığı ve Ulaştırma Bakanlığı'na bağlı Demiryolları Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı (DLH) Genel Müdürlüğü tarafından ampirik yöntemlerden ACN/PCN ve FAA yöntemleri kullanılmaktadır.

2. KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI TASARIMI

Karayolu üstyapı tasarımının amacı, esas alınan tasarım ömrü boyunca, üzerinden geçecek olan trafiği, büyük deformasyonlara ve çatlamalara maruz kalmadan güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapı tabaka kalınlıklarının hesaplanması ve üstyapı tabakalarını oluşturacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir [1].

Üstyapı tasarımında ampirik, ampirik analitik ve analitik olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır. Ampirik yöntemler uygulamalardan kaynaklanan bilgi birikimleri ve özel olarak yapılmış deneme yollarından edinilen deneyimlere dayanmaktadır. Dolayısıyla ampirik yöntemler, üzerinde uygulandığı deneme yolunun koşullarından daha farklı koşullarda uygun sonuç vermemektedir. Buna karşılık analitik yöntem; teorik analiz ve bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerini kullanmakta ve her türlü koşulda uygulanabilmektedir [2].

Bu bölümde, belirtilen üç tip yöntem açıklanmakta ve her biri için ayrı ayrı örnekler sunulmaktadır. Ampirik tasarım yöntemleri için AASHTO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi, ampirik-analitik yöntemler için AASHTO'nun 1972 den sonraki yöntemleri ve Asfalt Enstitüsü'nün Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi, analitik yöntemler için ise, Shell Üstyapı Tasarım Yöntemi örnek olarak açıklanmış bulunmaktadır.

2.1 Ampirik Yöntemler

Bu tasarım yöntemlerine göre, üstyapı kalınlığı, taban zemininin direncine, kullanılan malzemelerin özelliklerine ve üstyapının tasarım ömrü boyunca maruz kalacağı tahmin edilen trafik yüklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Ampirik yöntemlerden Kaliforniya Taşıma Oranı, Rode Note 29 ve AASHTO 1972 Üstyapı Tasarım Yöntemleri uzun yıllar kullanılmış yöntemlerdir [2].

İlk olarak üstyapı tasarım yöntemi, AASHTO tarafından 1950-1960 yılları arasında yapılan deney yolu sonuçlarından yararlanılarak hazırlanmıştır. Üstyapı tasarım yöntemi “AASHTO Projelendirme Geçici Rehberi” adı ile 1961’de yayınlanmış ve 1972’de rehberin ikinci baskısı yapılmıştır [3]. Bu bölümde ampirik yöntemlere örnek olarak AASHTO 1972 Üstyapı Tasarım Yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Kaliforniya Taşıma Oranı Yöntemi, CBR deneyi uygulanarak taban zemini ve granüler malzemelerin direncinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Üstyapının toplam kalınlığı, taban zemininin belirli dingil yükleri için belirlenen CBR değeriyle ilişkilendirilmektedir. Road Note 29 Tasarım Yöntemi, Kaliforniya Taşıma Oranı yöntemine benzer özellikler taşımaktadır. Tabakaların kalınlıkları taban zemininin CBR değeri ve kullanılan bitümlü malzemelerin tipi ile ilişkilendirilmektedir. Analitik yöntemlerin ortaya çıkmasına kadar, İngiltere’deki birçok yol üstyapısı Road Note 29 kullanılarak tasarlanmıştır [2].

2.1.1 AASHTO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

Bu yöntem kapsamında, üstyapı tasarımı için birkaç önemli parametre tanımlanmıştır [4]. Bu parametrelerden ilki, hizmet yeteneği (PSR-Present Serviceability Rating) dir. Bir üstyapının hizmet yeteneği, tasarımda kullanılan trafiğe hizmet edebilme yeteneğidir. AASHTO yol deneylerine göre performans, tüm üstyapılar için yapım ve işletme süresi boyunca hizmet edebilme yeteneği olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemde, hizmet yeteneği, 5 en iyi üstyapıyı temsil etmek üzere, 0-5 arasında değişen değerler almaktadır. Ayrıca, üstyapının çeşitli fiziksel ölçümler ve PSR korelasyonu ile yapılan istatistiksel analizler sonucunda, mevcut hizmet yeteneği indeksi, PSI (Present Serviceability Index) ya da p tanımlanmıştır.

Esnek üstyapı için, AASHTO yol deneyleri sonucunda bu korelasyon eşitliği;

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log (1 + SV) - 1.38 \overline{RD^2} - 0.01 (C + P)^{1/2} \quad (2.1)$$

şeklinde geliştirilmiştir [5].

Burada;

PSI veya p = Hizmet yeteneği indeksi,

- SV = Ortalama eğim değişimi (boyuna ondülasyon ölçümü),
- \overline{RD} = Ortalama tekerlek izi derinliği, inç (cm)
- C = Çatlaklar (her 100 ft² (9.29m²) de yorulma ve diğer tip çatlak alanı)
- P = Yamalar (Her 1000 ft² (92.9 m²) de yapılan yama alanı) olarak ifade edilir.

Esnek üstyapılar için, AASHTO projelendirme eşitlikleri, tabaka kalınlıkları, malzeme tipi ve performansı belirleyen yüklere (dingil yüklerinin büyüklüğüne ve yük tekrar sayısına) dayanmaktadır.

Tasarım Esasları

Esnek üstyapı için AASHTO yol deneyleri sonucu geliştirilen temel eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$G_t = \beta (\log W_t - \log p) \quad (2.2)$$

$$\beta = 0.40 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(\overline{SN} + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (2.3)$$

$$\log p = 5.93 + 9.36 \log (\overline{SN} + 1) - 4.79 \log (L_1 + L_2) + 4.33 \log L_2 \quad (2.4)$$

Burada;

G_t = t analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksindeki kaybın, $p_t = 1,5$ alınmasına karşılık gelen toplam potansiyel kayba oranının logaritmik fonksiyonu,

$\beta = (p_t)$ 'yi (W_t)' ye bağlayan hizmet yeteneği eğrisini etkileyen proje ve yük bileşenlerinin fonksiyonu,

P = Proje ve yük bileşenlerinin bir fonksiyonu olup, hizmet yeteneği indeksinin 1,5 olmasına karşılık geleceği tahmin edilen dingil yükü uygulama sayısı,

W_t = t analiz süresi sonuna kadar tekrar edecek dingil yükü sayısı,

p_t = t analiz süresi sonunda hizmet yeteneği indeksi,

L_1 = tek dingil ya da bir tandem üzerindeki yük,

L_2 = dingil sayısı (tek dingil için $L_2 = 1$ ve tandem dingil için $L_2 = 2$)

\overline{SN} = üstyapı sayısıdır.

Çözüm olarak; yük faktörlerinin tümü standart taşıt yüklerine dayanarak ifade edildiğinde işlem oldukça kolaylaşmaktadır. AASHTO yol deneyinde $L_1= 8.2$ ton ve $L_2= 1$ olarak eşdeğerlilik yük faktörleri ile birlikte alınmıştır. (AASHTO Eşdeğerlik yük faktörleri Ek-1 de gösterilmiştir). Yeni esnek üstyapı tasarımı için yol deneylerinde yapılan analizler sonucu PSI başlangıç değeri 4,2 olarak alınmıştır. Bu değer standart L_1 ve L_2 değerleri ile kullanıldığında, eşitlik aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$\log W_{t8.2} = 9,36 \log (\overline{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\log[(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(\overline{SN} + 1)^{5,19}]} \quad (2.5)$$

Burada;

$W_{t8.2}$ = Proje ömrü süresince eşdeğer standart 8.2 ton (18kip) tek dingil yükü tekrar sayısı (proje trafiği) dir.

Eşitlik 2.5, AASHTO yol deneylerinin yapıldığı taban zemini ve çevresel koşullar için temel esnek-üstyapı tasarımını ifade etmektedir. Çeşitli koşullarda eşitliğin uygulanabilirliği için, eşitliğe zemin taşıma değeri (S) ve bölgesel faktör (R) dahil edilmiştir. Taban zemini için taşıma değeri $S= 3$, AASHTO yol deneylerinde zemin tiplerinin başlangıç değeri olarak kullanılmıştır. İkinci olarak, ince mıcır-taş temeller kullanılarak taşıma değeri $S = 10$ oranında belirlenmiştir. Bu ilişki aşağıdaki ifadede verilmiştir.

$$\log W_{t8.2} = \log N'_{t8.2} + K(S_i - S_0) \quad (2.6)$$

Burada;

S_i = Her i durumu için zemin taşıma değeri,

S_0 = Yol deneyi koşullarındaki zemin taşıma değeri,

$W_{t8.2}$ = i koşullarında toplam dingil yükü tekrar sayısı,

$N'_{t8.2}$ = Yol deneyi koşullarında toplam dingil yükü tekrar sayısı,

K = Regresyon katsayısıdır. ($K= 0,372$)

Yol deneyinin yapıldığı koşullardan farklı iklim koşullarının etkisini hesaba katmak için eşitliğe, R, bölge faktörü dahil edilmiştir. Uygulanan toplam yük, bölge faktörü ile ters orantılı olarak yazılır;

$$W_{t8.2} = N_{t8.2} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (2.7)$$

Son olarak gerekli değişiklikler yapıldığında esas esnek üstyapı tasarım ifadesi;

$$\log W_{t8.2} = 9,36 \log (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(SN + 1)^{5,19}]} + \log \frac{1}{R} + 0,372(S_i - 3,0) \quad (2.8)$$

şeklini almaktadır. Burada;

P_t = Son hizmet yeteneği indeksi,

SN = Üstyapı sayısı,

R = Bölge faktörüdür.

S_i veya CBR zemin taşıma değeridir. SN üstyapı sayısının hesabı için, S zemin değeri, $W_{t8.2}$ eşdeğer dingil yükü tekrar sayısına bağlı nomograf çözümü Şekil 2.1' de verilmiştir. Burada öncelikle \overline{SN} değeri bulunur, R bölge faktörü ile düzeltilerek gerçek üstyapı sayısı SN değeri hesaplanmaktadır.

Son Hizmet Yeteneği İndeksi, P_t

Son hizmet yeteneği indeksi genellikle 2.0 ve 2.5 olarak alınmaktadır. P_t ; trafik analiz periyodu sonunda, bir yolun yeniden takviye veya yeniden yapımı gerekmeksizin izin verilebilecek en düşük hizmet yeteneği değeridir. Ana yolların (otoyollar, ekspres yollar, devlet yolları) projelendirilmesinde P_t değeri 2.5 , daha az kapasiteli yollar (il yolları) için ise, P_t değeri 2.0 olarak alınmaktadır. Genel olarak, P_t değerinin hiçbir zaman 2.0'nin altında alınmaması gerekmektedir. Tali yollar için P_t değeri 2.0 alınırken, trafik analiz süresinin azaltılması önerilmektedir.

Eşdeğer Dingil Yüğü Tekrar Sayısı , ETDY

AASHTO Tasarım Yöntemi için, eşdeğer 8,2 ton tek dingil yüğü tekrar sayısı, yol yapımının bitiminden, hizmet yeteneği indeksinin seçilen değere (P_t : 2.5 veya P_t : 2.0) düşeceği zamana kadar hesap şeridinin taşıyacağı umulan toplam trafiktir. Trafik analiz süresi genellikle 20 yıl olarak seçilmektedir. Proje trafiği, seçilen trafik analiz süresi boyunca, günlük veya toplam 8.2 ton eşdeğer tek dingil yüğü tekerrür sayısı cinsinden ifade edilmektedir.

Ek-1 de görüleceği gibi, eşdeğerlik faktörleri ve $W_{t8.2}$ dingil yüğü tekrar sayısı, P_t ve SN' in fonksiyonudur. Birçok projelendirme probleminde, eşdeğerlik analizi için SN değeri 3,0 olarak alınmaktadır. Bu değer, $W_{t8.2}'$ in hesabında genellikle iyi sonuçlar vermektedir [5].

Trafiğin Değerlendirilmesi

Üstyapı projelendirilmesinde, üstyapı kalınlıklarını belirleyen faktörlerin en önemlilerinden biri trafik yükleridir. Projelendirme amacıyla karayolu üzerinden geçen çeşitli dingil yükleri 8.2 ton eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına çevrilerek, dingil yükleri bulunur [6, 7].

İlk gün için günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (r) ise, (t) sene sonraki günlük trafik:

$$t_t = t_0 (1+r)^t \quad (2.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Ortalama günlük proje trafiği (t_p);

$$t_p = 0,4343 \frac{t_t - t_0}{\log \frac{t_t}{t_0}} \quad (2.10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Yoldan proje süresi boyunca geçecek toplam trafik (T_p) ise,

$$T_p = t_p \times 365 \times t \quad (2.11)$$

şeklinde bulunmaktadır.

Bundan sonra, taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF), yön dağıtma faktörü (D_y) ve hesap şeridi faktörü ($D_ş$) belirlenerek proje süresi boyunca yoldan geçecek Toplam Standart Dingil Yüğü Tekrar Sayısı ($W_{t8,2}$);

$$W_{t8,2} = T_p \times \text{TEF} \times D_ş \times D_y \quad (2.12)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Şerit dağıtma faktörleri ($D_ş$) ise, Tablo 2.1' de görüldüğü gibi yüzde olarak ifade edilir ve şerit sayısına göre değişmektedir.

Tablo 2.1: Şerit Dağıtma Faktörü ($D_ş$)

BİR YÖNDEKİ ŞERİT SAYISI	ŞERİT DAĞITMA FAKTÖRÜ ($D_ş$)
1	1,0
2	0.80-1.0
3	0.60-0,80
4	0.50-0.75

Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF)

AASHTO'ya göre, esnek üstyapılarda; tek, tandem ve tridem dingil yükleri, standart tek dingil yükü (8,2 ton) sayısına dönüştürülmüştür. Dingil Eşdeğerlik Faktörleri (DEF) tabloları Ek-1' de verilmiştir [6, 7]. Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri ise;

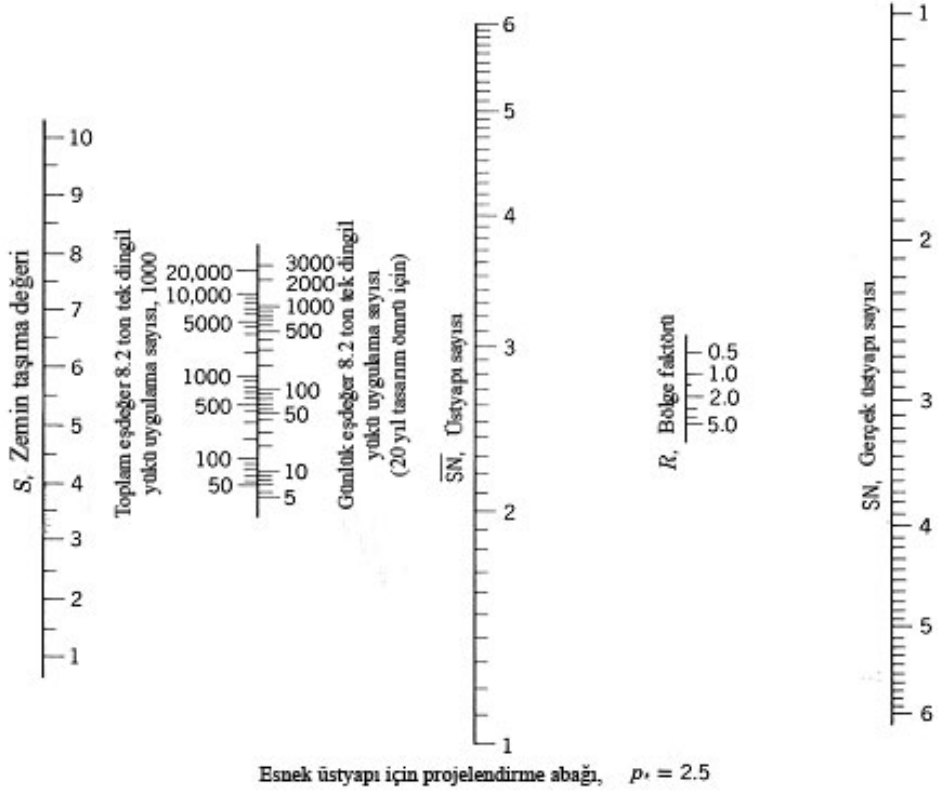
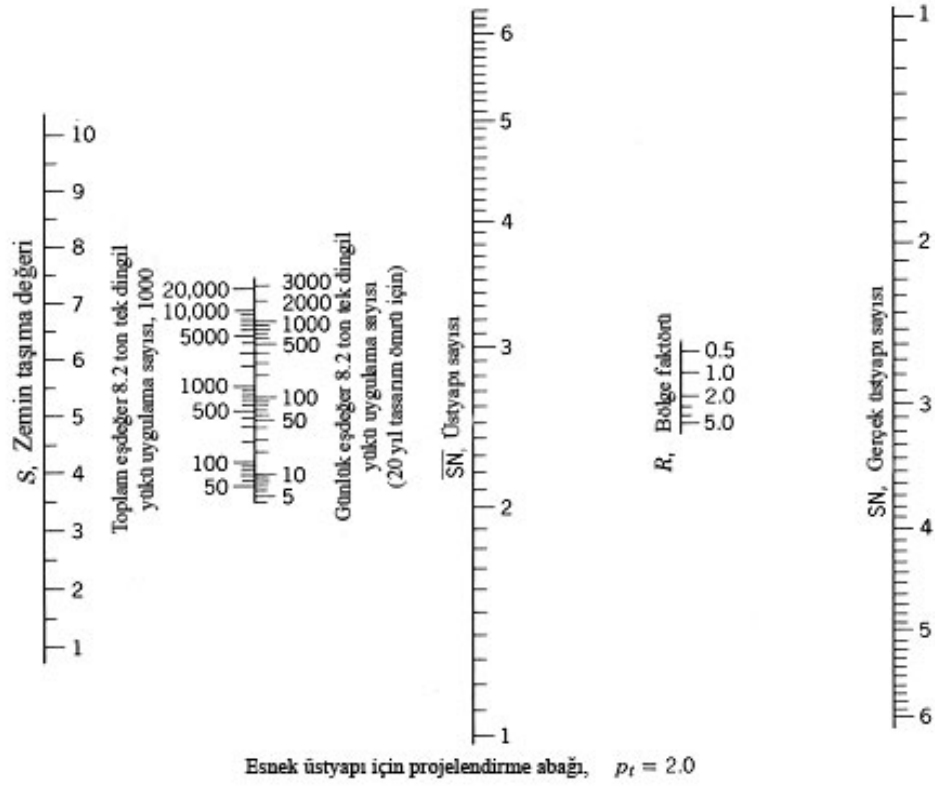
$$TEF = \frac{\sum W_{dingil} x DEF}{\sum Araç} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Tablo 2.2' de trafik grubu ve trafik kategorisine bağlı olarak Taşıt Eşdeğerlik faktörleri verilmiştir.

Tablo 2.2: Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF)

TRAFİK	TRAFİK KATEGORİSİ (TİCARİ ARAÇ/ GÜN)				
Grubu	0-250	250-500	500-1500	1500-3000	>3000
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



Şekil 2.1: Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı (AASHTO 1972)

Bölge Faktörü, R

İklim ve çevre koşulları, AASHTO yol deneyinin yapıldığı bölgeden farklı olan yerlerde tasarım eşitliğinin uygulanabilirliği için, AASHTO projelendirme eşitliğine Bölge Faktörü (R) dahil edilmiştir. Mevcut durumda bölge faktörünün tam olarak tespit edilebilmesini sağlayan bir yöntem yoktur. Çeşitli iklim koşullarında yapılan yol deneyi sonuçlarından faydalanarak, AASHTO yönetmeliğinde tipik R değerleri verilmiştir. Bu değerler Tablo 2.3' de gösterilmiştir [1].

Tablo 2.3: Bölge Faktörü Değerleri

ZEMİN	R
Donmuş taban zemini (12,5 cm veya daha fazla derinlikte)	0,2-1,0
Kuru Taban zemini (yazın ve sonbaharda)	0,3-1,5
Doygun taban zemini (İlkbaharda don çözülmesinde)	4,0-5,0

Üstyapı Sayısı, SN

SN üstyapı sayısı, proje trafiği, zemin taşıma değeri, son hizmet yeteneği indeksi, ve bölge faktöründen türetilen ve çeşitli esnek üstyapı tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılacak olan izafi bir değerdir. Burada her bir üstyapı tabakası için kullanılacak malzeme tipine bağlı tabaka katsayılarına ait sabitlerin kullanımı ile, SN değerinden yararlanılarak tabakaların kalınlıkları belirlenmektedir. Üstyapı tabakalarının katsayıları (a_1 , a_2 , a_3 , sırasıyla kaplama, temel ve alt temel için), SN değeri ile tabaka kalınlıkları arasındaki ampirik ifadede, uygun malzeme kompozisyonunu temsil etmektedir [3].

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (2.14)$$

Burada D_i değeri farklı tabaka kalınlıklarını ifade eder.

Tablo 2.4: AASHTO' ya ait Tabaka Katsayıları

ÜSTYAPI BİLEŞENİ	TABAKA KATSAYISI (A_i)
Kaplama Tabakası	
Roadmix	0.20
Plentmix	0.44
Kum asfalt	0.40
Temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0.07
Kırmataş	0.14
Çimento Stabilize	
Basınç dayanımı	
650 psi veya fazla	0.23
400 psi, 650 psi arası	0.20
400 psi veya az	0.15
Bitümlü stabilize	
Kalın cins	0.34
Kum asfalt	0.30
Çimento stabilize	0.15-0.30
Alt temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0.11
Kum veya kumlu kil	0.05-0.10

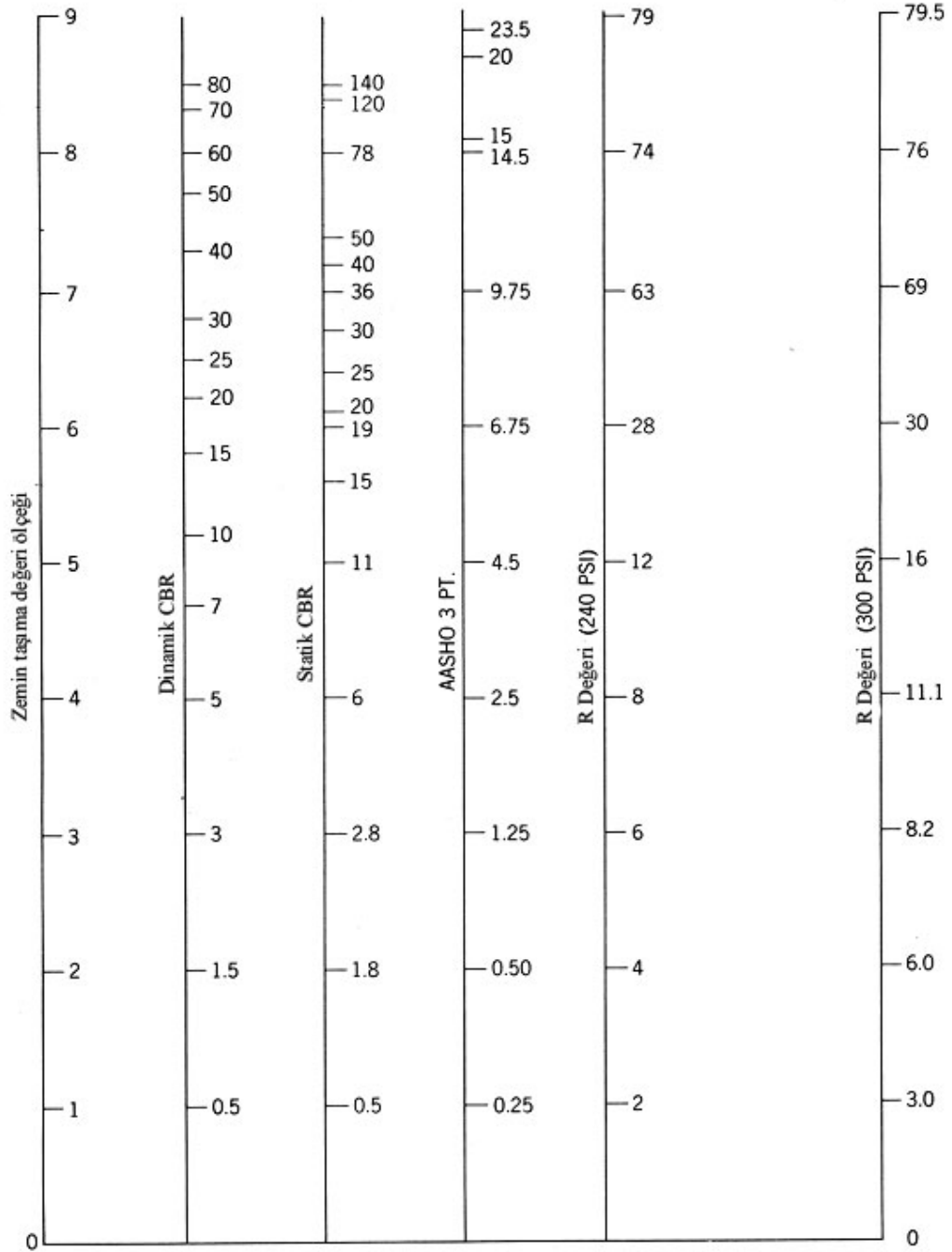
AASHTO yol deneyinde, kırmataş, çakıl, çimento stabilize çakıl ve bitümlü stabilize olmak üzere dört tip malzeme kullanılmıştır. Farklı malzeme tipleri için, tabaka katsayıları AASHTO tasarım rehberinde Tablo 2.4' deki gibi verilmiştir. Tabaka kalınlıklarının herhangi bir kombinasyonu ve seçilen malzeme tiplerinin Eşitlik 2.14' deki SN değerini sağlaması gerekmektedir [5].

Zemin Taşıma Değeri, S

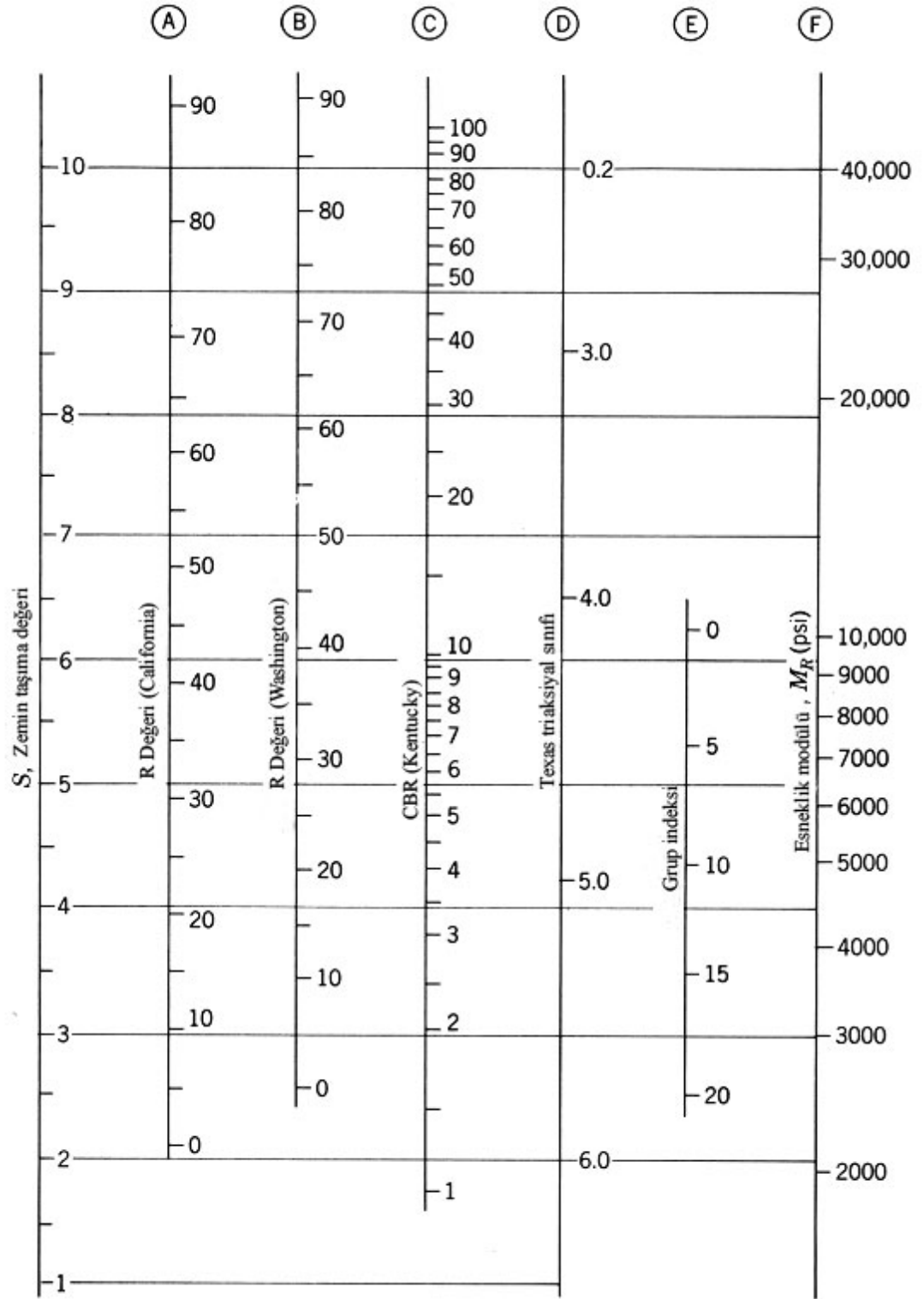
AASHTO Esnek Üstyapıları Projelendirme Yönteminin kaynak yayınlarında, zeminin taşıma özelliğini gösteren birçok ayrı ölçek geliştirilmiştir. Bu değer, deneyler ile doğrudan belirlenmemektedir. Her proje kuruluşu standart zemin deneyleri (CBR, R, üç-eksenli basınç deneyleri vs.) ve zemin taşıma değerinin korelasyonunu oluşturan bir yönetmelik kullanır. Şekil 2.2, Utah State Highway Department (1920) tarafından oluşturulan korelasyonu göstermektedir. [8, 9].

Şekil 2.3 ise, NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 128 inç teorik tabaka analizini esas alarak geliştirdiği korelasyonu göstermektedir [10]. Bu

iki çalışmada S değerleri için farklı sonuçların bulunması, S değerinin belirlenmesinde bir mühendislik çalışmasının yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.2: Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (Utah State Highway Department)



Şekil 2.3: Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (NCHRP 128)

Minimum Tabaka Kalınlıkları

Önerilen minimum tabaka kalınlıkları, kaplama, temel ve alt temel için sırasıyla 2 inç (5.08 cm), 4 inç (10.16 cm) ve 4 inç (10.16 cm)'tir. Ancak alt temel için minimum tabaka kalınlığı, alt temel yapılması gerektiği takdirde dikkate alınmalıdır [5].

AASHTO (1972) Tasarım Yöntemi ile Tasarım Örneği

Uluslararası karayolu, 1200×10^3 18 kip (8.2 ton) tek dingil yükü tekrar sayısı için projelendirilecektir. Bölge faktörü $R=1,2$ 'dir. Olası malzemeler ve deney değerleri aşağıda özetlenmiştir [5].

Taban zemini CBR=5 (plastik kil)

Alt temel CBR= 20 (kum-çakıl)

Temel CBR= 80 (kırmataş)

q_u (basınç mukavemeti-7 gün) = 500 psi (35.15 kgf/ cm²) (çimento stabilize temel)

E (elastisite modülü) = $2,5 \times 10^5$ psi (17578 kgf/ cm²) (asfalt ile stabilize temel)

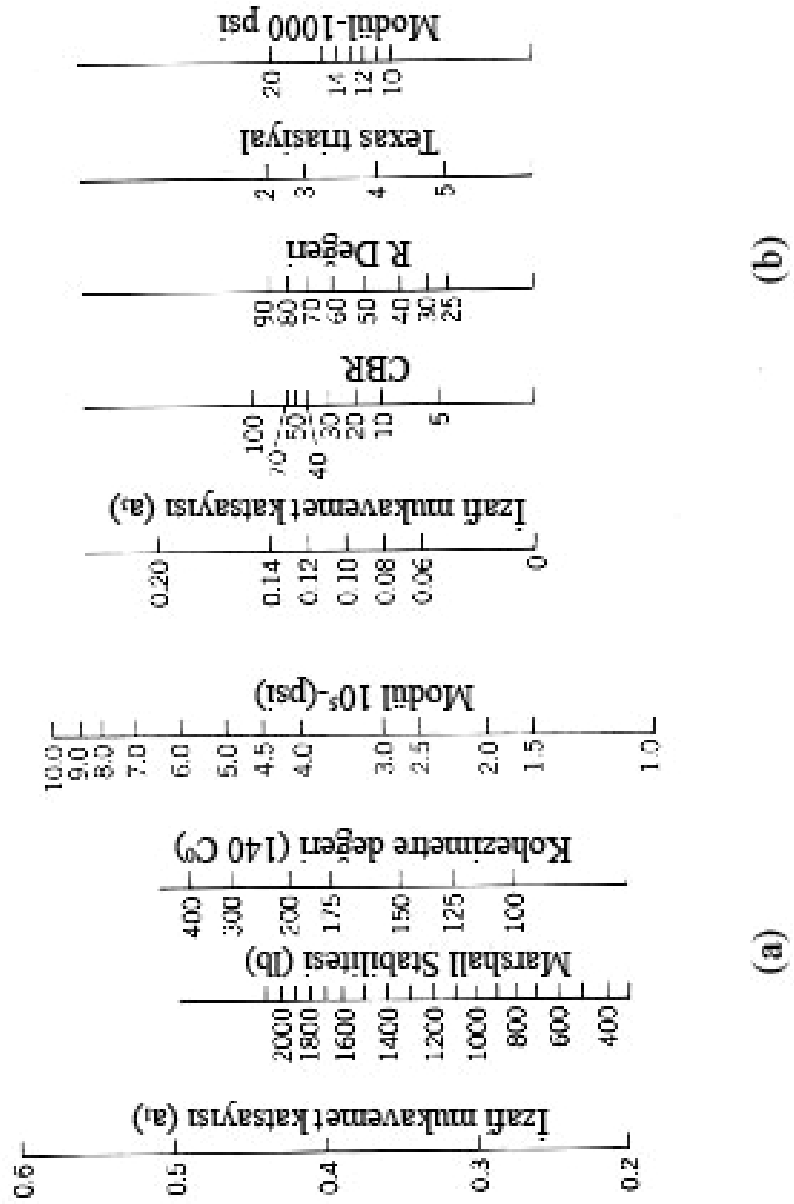
Kaplama E= $4,3 \times 10^5$ psi (30232 kgf/ cm²) (asfalt betonu)

Problem, esnek üstyapı tasarımının, geleneksel (conventional) esnek üstyapı, çimento-stabilize üstyapı ve asfalt-stabilize üstyapı için yapılmasıdır.

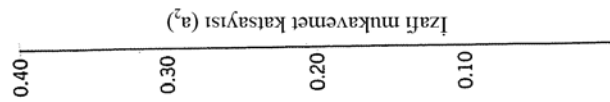
Çözüm:

Şekil 2.2 (Utah State Highway Correlation) abağı kullanılarak zemin taşıma değeri $S = 4$ olarak bulunmuştur. Yolun, uluslararası karayolu olduğu dikkate alındığında, $P_t=2,5$ olarak seçilir. Şekil 2.1 abağından $W_{t8,2}= 1200$, $S= 4$, $R= 1,2$ ve $P_t=2,5$ için $SN=3,78$ olarak okunur.

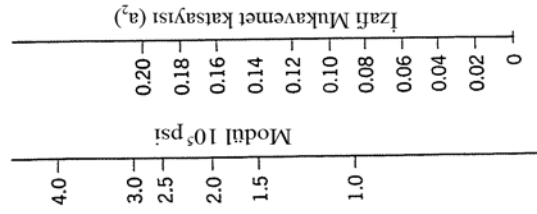
Böylelikle, tabaka kalınlıkları ve kullanılacak malzeme çeşitlerinin tüm kombinasyonları için;



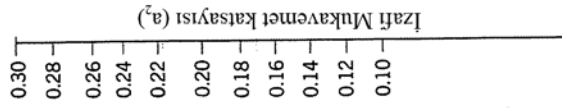
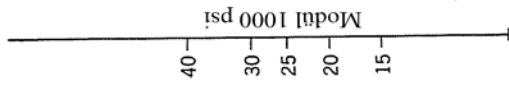
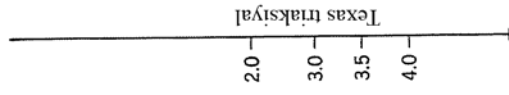
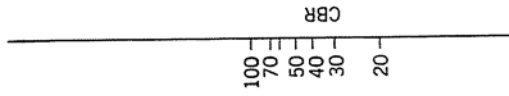
Şekil 2.4: AASHTO Tabaka Katsayıları Nomografi (a) a_1 Kaplama tabakası parametreleri (b) a_3 granüler alt temel (c) a_2 bitümlü temel (d) a_2 granüler temel (e) a_2 çimento-stabilize temel



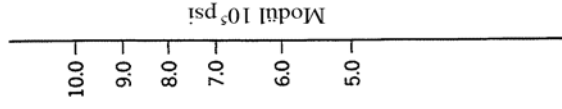
(c)



(d)



(e)



Şekil 2.4: AASHTO Tabaka Katsayıları Nomografı (a) a_1 Kaplama tabakası parametreleri (b) a_3 granüler alt temel (c) a_2 bitümlü temel (d) a_2 granüler temel (e) a_2 çimento-stabilize temel- devamı

$SN=a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 = 3,78$ olmalıdır. Şekil 2.4 abaklarından tabaka katsayıları alt temel için; $a_3 = 0,095$, temel için; $a_2 = 0,13$ (kırmataş), $a_2 = 0,17$ (çimento-stabilize temel, ÇST), $a_2 = 0,25$ (asfalt-stabilize temel, AST) ve kaplama tabakası için $a_3 = 0,42$ olarak alınır.

Geleneksel üstyapı: $0,42D_1 + 0,13D_2 + 0,095D_3 = 3,78$

ÇST : $0,42D_1 + 0,17D_2 + 0,095D_3 = 3,78$

AST : $0,42D_1 + 0,25D_2 + 0,095D_3 = 3,78$

Asfalt betonu kaplama tabakası için alınabilecek minimum kalınlık $D_1= 5$ inç (12,7 cm) olarak belirlenmiştir. Tablo 2.5' de çözüm örnekleri özetlenmiştir. Örnekler incelendiğinde, her bir seçeneğin geleneksel üstyapı tasarımı için minimum SN koşulunu sağladığı görülmektedir. (S= 4 ve SN= 3,78 için)

Bunun yanında, alt temel malzemesi için Şekil 2.2'den S=6 ve temel için S= 8,5, Şekil 2.1'den bu iki tabaka için SN değerleri 2,82 ve 1,95 olarak okunur. Böylece bu koşullarda, taban zemininin üstü için $SN \geq 3,78$, alt temel üstü için $SN \geq 2,82$ ve temel üstü için $SN \geq 1,95$ olmalıdır. Tablo 2.5'e bakıldığında, 1. seçenek hariç, tüm çözümlerin bu koşula da uyduğu görülmektedir. 1. seçenekte alt temelden sonraki tabakaların $SN= (2,1+0,52)= 2,62$ değerinin 2,82'den küçük olduğu da anlaşılmaktadır.

Her tabaka için minimum kalınlık;

$$D_{1\min} = \frac{SN_2}{a_1} = \frac{1,95}{0,42} = 4,64 \text{ inç (5 in., 12.7 cm)}$$

$$D_{2\min} = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a_2} = \frac{2,82 - 2,10}{0,13} = 5,54 \text{ inç (6in, 15.24 cm)}$$

$$D_{3\min} = \frac{SN_4 - (SN_2^* + SN_3^*)}{a_3} = \frac{3,78 - (2,88)}{0,095} = 9,47 \text{ inç (9,5 in, 24,13 cm)}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 2.5: AASHTO 1972 Tasarım Yöntemi İçin Örnek Problem

Stabilizesiz temel				
	Malzeme	Tabaka kalınlığı	Tabaka katsayısı	$D_i \cdot a_i$
1	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 4$	0.13	= 0.52
	Kum-çakıl	$D_3 = 12.5$	0.095	= 1.19
				3.81
2	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 6$	0.13	= 0.78
	Kum-çakıl	$D_3 = 9.5$	0.095	= 0.90
				3.78
3	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 8$	0.13	= 1.04
	Kum-çakıl	$D_3 = 7$	0.095	= 0.67
				3.81
4	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 10$	0.13	= 1.30
	Kum-çakıl	$D_3 = 4$	0.095	= 0.38
				3.78
Çimento- Stabilize Temel (ÇST)				
1	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	ÇST	$D_1 = 4$	0.17	= 0.68
	Kum-çakıl	$D_3 = 11$	0.095	= 1.05
				3.83
2	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	ÇST	$D_1 = 6$	0.17	= 1.02
	Kum-çakıl	$D_3 = 7$	0.095	= 0.67
				3.79
3	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	ÇST	$D_1 = 8$	0.17	= 1.36
	Kum-çakıl	$D_3 = 4$	0.095	= 0.38
				3.84
Asfalt- Stabilize temel				
1	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 8$	0.25	= 1.00
	Kum-çakıl	$D_3 = 7.5$	0.095	= 0.71
				3.81
2	Asfalt Betonu	$D_1 = 5$	0.42	= 2.10
	Kırmataş	$D_1 = 6$	0.25	= 1.50
	Kum-çakıl	$D_3 = 4$	0.095	= 0.38
				3.98

2.2 Ampirik-Analitik Yöntemler

Artan dingil yükleri, trafik hacmi ve yüksek hızlara karşı üstyapının hizmet yeteneğini sürdürebilmesi için AASHTO'nun üstyapı projelendirme yönteminde modifikasyona gitmesi kaçınılmaz olmuştur. 1972'de, ampirik yöntemi esas alan "AASHTO Üstyapı Projelendirme Rehberi", analitik yaklaşımla geliştirilerek, 1986'da ampirik-analitik yaklaşıma dayanan "AASHTO Üstyapı Projelendirme Rehberi"nin 3. baskısı yayınlanmıştır. Bu rehberde esnek üstyapı tasarımı ile ilgili önemli değişiklikler yapılmıştır.

1993 yılında AASHTO Tasarım Rehberi'nin gözden geçirilmiş hali yayınlanmış, bununla birlikte esnek üstyapı tasarım yöntemleri konusunda herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir [11].

Bu bölüm kapsamında, 1986 AASHTO Tasarım Yönteminde, 1972 yöntemine göre yapılan gelişmeler ve eklemelere değinilmiş ve ampirik-analitik tasarım yöntemine örnek olarak AASHTO 1993 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Türkiye'de günümüzde, esnek üstyapı tasarımı için bu yöntem kullanılmaktadır.

2002'de AASHTO daha detaylı bir çalışmayı gerektiren son rehberi yayınlamıştır. Kapsamı nedeniyle bu bölümde sadece 2002'de AASHTO 1993 yöntemine göre yapılan gelişmelere kısaca değinilmiştir.

Ayrıca, 1964 yılında ABD'de değişik yol deneylerine dayanan ampirik bir yöntem olarak, Asphalt Enstitüsü yöntemi geliştirilmiştir. Asphalt Enstitüsü'nün, çok tabakalı elastik teoriye dayanan 1991 yılındaki yöntemi ise ampirik-analitik yaklaşım göstermektedir. Bu yöntem, bu çalışmada, karayolu ve havaalanı esnek üstyapı tasarımına örnek olarak ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

2.2.1 AASHTO Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemleri

2.2.1.1 AASHTO 1986 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

AASHTO 1986 yönteminde, AASHTO 1972' ye yapılan bazı ilaveler ve gelişmeler yer almaktadır.

Bu yöntemde, esnek üstyapı tasarımına aşağıda belirtilen hususlar dahil edilmiştir;

-Yönteme, malzeme özelliklerinin belirlenmesini kolaylaştırmak ve rasyonel bir deney modeli oluşturmak için esneklik modülü (M_R) ilave edilmiştir.

-CBR ve R değerleri için tabaka katsayıları, M_R 'ye göre tekrar tanımlanmıştır.

-Çevresel faktörler (nem ve ısı) nesnel olarak rehberde dahil edilmiş olup, çevresel koşulların tasarım uygulamasına daha rasyonel şekilde dahil edilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, daha önce uygulanmakta olan nesnel ve bölgesel uygulamanın yerini almıştır.

-Ayrıca, güvenilirlik kavramı ilavesiyle, üstyapı mühendislerinin tasarımlarına risk analizi kavramını dahil etmelerine olanak sağlanmıştır. Güvenilirlik kavramı, üstyapının hizmet yeteneğini yeterli süre koruması olasılığı veya üstyapının maruz kaldığı yükün; üstyapının minimum hizmet yeteneği değerini aşmayacak şekilde, karşı koyabileceği sınırlar dahilinde olması hali olarak açıklanabilmektedir.

2.2.1.2 AASHTO 1993 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

1986 rehberinden sonra, 1993 yılında AASHTO Tasarım rehberinin gözden geçirilmiş hali yayınlanmış, ancak, esnek üstyapı tasarım yöntemi konusunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır [11].

Hizmet yeteneği-davranış ilişkisine dayalı bu yöntem; zemin taşıma gücüne, trafik yüküne, bölge ve iklim koşullarına ve üstyapı tabakalarının özelliklerine bağlı olarak tabaka kalınlıklarını vermektedir.

Taban zemininin taşıma gücü, üstyapı kalınlıklarını etkileyen önemli bir faktördür. Zemin taşıma gücü, zeminin esneklik modülü M_R ile belirlenmektedir. Esneklik modülü, laboratuvar deneyleri ile veya CBR değeri ile olan ilişkisinden, abaklar ya da formüller yardımıyla belirlenmektedir.

İklim ve çevre koşulları, üstyapı tabakalarının kalınlık hesabında dikkate alınan diğer etkenlerdir. İklim ve çevre verilerinin etkisi, zemin şişmesi ve donma kabarmasından kaynaklanan hizmet yeteneği kaybı hesaplanarak belirlenmektedir [6, 7].

Üstyapı Sayısının (SN) Belirlenmesi

AASHTO yol deneyi sonucunda, tabaka kalınlıkları ve hizmet yeteneği ilişkisine dayanan eşitlik (2.15) geliştirilmiştir [6, 7].

$$\log_{10} W_{t8,2} = Z_R S_0 + 9,36 \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M - 8,07 \quad (2.15)$$

Burada;

$W_{t8,2}$ = 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı (proje trafiği),

ΔPSI = $(p_0 - p_t)$ Proje hizmet yeteneği kaybı,

Z_R = Standart normal sapma,

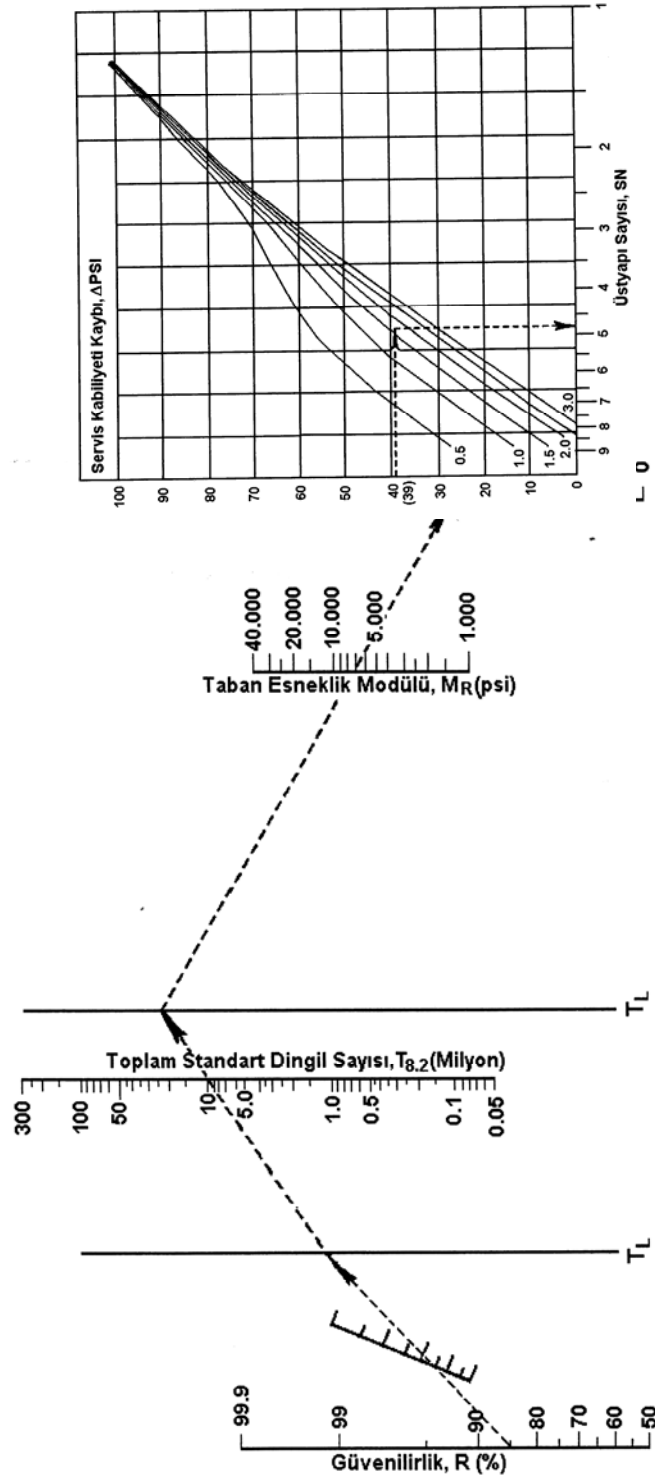
S_0 = Toplam standart sapma,

SN = Üstyapı sayısı (inç),

M_R = Tabakaların efektif esneklik modülü (psi),

R = Güvenilirlik,

anlamına gelmektedir.



Şekil 2.5: Asfalt Betonu Kaplamalı Yollar için Projelendirme Abağı (AASHTO 1993)

Üstyapı kalınlıklarının hesaplanması için bilinen $W_{t8,2}$, P_0 , P_t , Z_R , S_0 değerleri yardımıyla (2.15) denklemi çözülerek veya Şekil 2.5'te gösterilen abak yardımıyla SN üstyapı sayısı belirlenmektedir.

Zaman Kısıtları

Üstyapının Tasarımı için 'Performans Periyodu' nun ve 'Analiz Periyodu' nun seçimi gereklidir.

Performans Periyodu; Yolun hizmete açıldığı tarihten ilk takviye tabakası yapılacağı tarihe kadar geçen süre veya birden fazla takviye yapılmışsa, takviye işlemleri arasındaki süreleri belirtmektedir. Başka deyişle, yol üstyapısının başlangıç hizmet yeteneği indeksinden seçilen son hizmet yeteneği indeksine düştüğü ana kadar geçen süreyi ifade etmektedir [6].

Analiz Periyodu; Performans periyotlarının toplamı olarak ifade edilebilir. Bu ilk performans periyodu ile, devamında yapılan bir veya daha fazla takviyeyi içermektedir. [6].

Trafik (Proje Trafığı)

AASHTO 1993 rehberine göre proje trafiği, 1972 yönteminde açıklanan şekilde hesaplanabildiği gibi, aşağıda verilen eşitlikler ile de pratik olarak hesaplanmaktadır.

$$T_0 = t_0 \times 365 \quad (2.16)$$

$$T_P = T_0 \times \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right] \quad (2.17)$$

$$W_{8,2} = T_0 \times \text{TEF} \quad (2.18)$$

$$W_{t,8,2} = W_{8,2} \times \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right] \quad (2.19)$$

Proje şeridindeki trafiği hesaplama için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$W_{8,2} = W_{8,2} \times D_y \times D_s \quad (2.20)$$

$W_{8,2}$ = İki yöndeki toplam 8,2 ton eşdeğer dingil yükü tekrar sayısıdır.

Günlük ortalama trafik hacmi trafik gruplarına göre değil de değişik dingil yükü gruplarına göre verilmiş ise, analiz süresi için toplam eşdeğer dingil sayısı Ek-1' de verilmiş olan "Dingil Eşdeğerlilik Faktörleri" kullanılarak hesaplanmaktadır [6].

Tabaka Katsayıları (İzafi Mukavemet Katsayıları)

Hesaplanan SN üstyapı sayısından tabaka kalınlıkları hesaplanırken, kullanılan malzemelere bir katsayı verilmiştir. Bu tabaka katsayısı, SN ile kalınlık arasındaki ampirik bağıntıyı ifade etmekte ve malzemenin taşıma gücünün bir ölçüsü olmaktadır. İzafi mukavemet katsayıları, tabaka tip ve özelliklerine göre, tabakaların elastisite modüllerine bağlı olarak, Ek-2' de verilen abaklar aracılığı ile hesaplanmaktadır. [6, 7].

Ayrıca, granüler temel tabakaları için izafi mukavemet katsayısı eşitlik (2.21) ile de bulunabilmektedir.

$$a_2 = 0,249 (\log M_R) - 0,977 \quad (2.21)$$

Granüler alt temel tabakaları için izafi mukavemet katsayıları eşitlik (2.22) ile de bulunabilmektedir.

$$a_3 = 0,227 (\log M_R) - 0,839 \quad (2.22)$$

Güvenilirlik

Güvenilirlik; projelendirmesi yapılan üstyapıya ait proje kriterlerinin, belirlenen proje süresi boyunca hakim trafik ve çevre koşulları altında yoldan beklenen projelendirme şartlarını karşılama olasılığı olup, geleceğe yönelik kabul edilen trafik tahminleri ve hizmet yeteneğindeki sapmaların belirli bir sınır içinde tutulabilmesi için güvenilirliğin belirlenmesi gerekmektedir. Güvenilirlik seviyesi Tablo 2.6 ile seçilebilmektedir. Trafik ve performans tahmininin bileşik Toplam standart sapma (S_0) değeri ise öngörülen trafik projeksiyonunun güvenilirliğine bağlı olarak esnek üstyapılar için 0,40-0,50 arasında değişmekte olup ortalama olarak 0,45 alınmaktadır [7].

Tablo 2.6: Tavsiye Edilen Güvenilirlik Değerleri (AASHTO 1993)

YOLUN SINIFI	GÜVENİLİRLİK DEĞERİ, %R	STANDART NORMAL SAPMA Z_R
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yolu	70	-0,524

Drenaj

Temel ve alt temel tabakalarının M_R değerinde yetersiz drenaj koşullarında azalma olacağından, tabaka kalınlıklarının artırılması gerekmektedir. Üstyapının alt tabakalarındaki suyun uzaklaştırılmasında kullanılan drenaj yapılarının kabiliyetlerini tespit etmekte herhangi bir kriter olmamakla birlikte, Tablo 2.7 bununla ilgili bir rehber olarak kullanılabilir [7].

Tablo 2.7: Tavsiye Edilen Drenaj Katsayıları (AASHTO 1993)

DRENAJ KALİTESİ	SUYUN UZAKLAŞTIRMA SÜRESİ	KAPLAMANIN DOYGUNLUK SEVİYESİNE YAKIN SU İÇERİĞİNE MARUZ KALDIĞI SÜRENİN YÜZDESİ			
		<%1	<%1-5	%5-25	>%25
Çok iyi	<2 saat	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
İyi	1 gün	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Vasat	1 hafta	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Kötü	1 ay	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Çok Kötü	Dren yok	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

Çevresel Etkiler

Çevre, üstyapı performansına birkaç yolla etki edebilmektedir. Sıcaklık ve nem değişiklikleri, gerilmeler üzerinde, dengenin sağlanmasında, yük taşıma kapasitesinde ve taban zemin malzemesi üzerinde etkili olabilmektedir. Diğer ana çevresel etkiler de, taban zemini şişmesi, üstyapı şişmesi, don kabarması, dağılmalar,

v.b. gibi doğrudan oluşan etkiler, seyir kalitesinde ve hizmet yeteneği indeksinde kayıplara sebep olmaktadır [6].

Hizmet yeteneği indeksi kaybının belli bir oranını oluşturan taban zemini şişmesi ve don kabarması, potansiyel etkisi olan önemli çevresel faktörlerdir. Şişme, taban zemininin nem emerek genişlemesi şeklinde olur. Bu durumda, hacim değişikliği meydana gelir. Nem emmenin azaltılabilmesi, drenaj sisteminin etkili olmasıyla mümkündür [6].

Don kabarması da, taban zemininde birikmiş nemin donması sonucu, hacim değişikliğinin oluşmasıyla meydana gelir. Bu hacim değişikliği homojen bir şekilde olmadığından, kaplama tabakasında bükülmeler, bozulmalar oluşturur. Yüzeysel olarak görülebilen bu kabarmalar da taban zemini şişmesinde olduğu gibi, etkili bir drenaj sistemi ile azaltılabilir. Diğer etkili bir yöntem de, üst yapının taban zemininin, yeterli bir kalınlıkta dona hassas olmayan malzemeden oluşan bir tabakayla yalıtımı ile mümkündür [6].

Hem taban zemini şişmesi, hem de don kabarması hizmet yeteneği kaybını artırıcı bir etki yapar. Bunun sonucunda, erken takviye tabakası yapmak gerekir. Bu nedenle yapım yönteminde bu etki dikkate alınmış ve işleme katılmıştır [6].

Trafik, don kabarması ve taban zemini şişmesinin hizmet yeteneği indeksi üzerindeki etkisi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [6, 7].

$$\Delta \text{PSI} = \Delta \text{PSI}_{\text{trafik}} + \Delta \text{PSI}_{\text{şişme}} + \Delta \text{PSI}_{\text{don kabarması}} \quad (2.23)$$

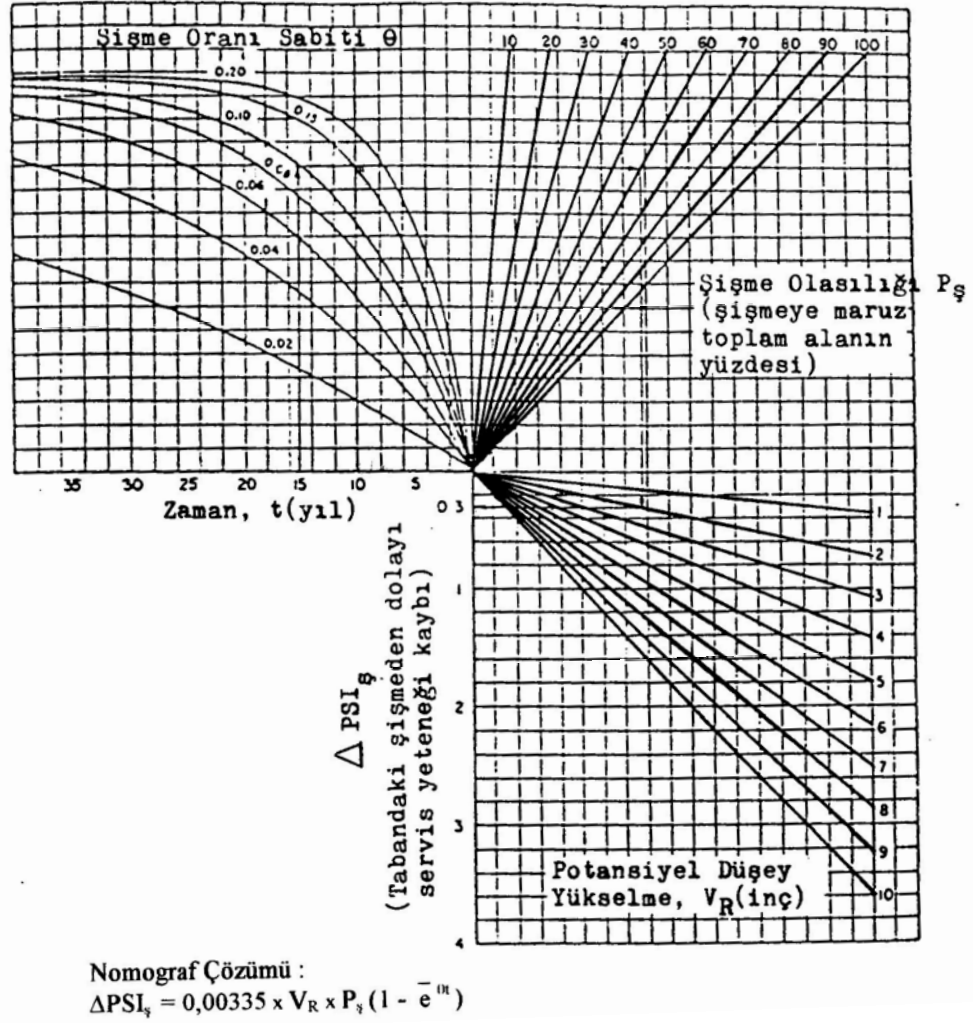
Burada,

ΔPSI = Hizmet yeteneği indeksinde ki toplam azalma,

$\Delta \text{PSI}_{\text{trafik}}$ = Trafik nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

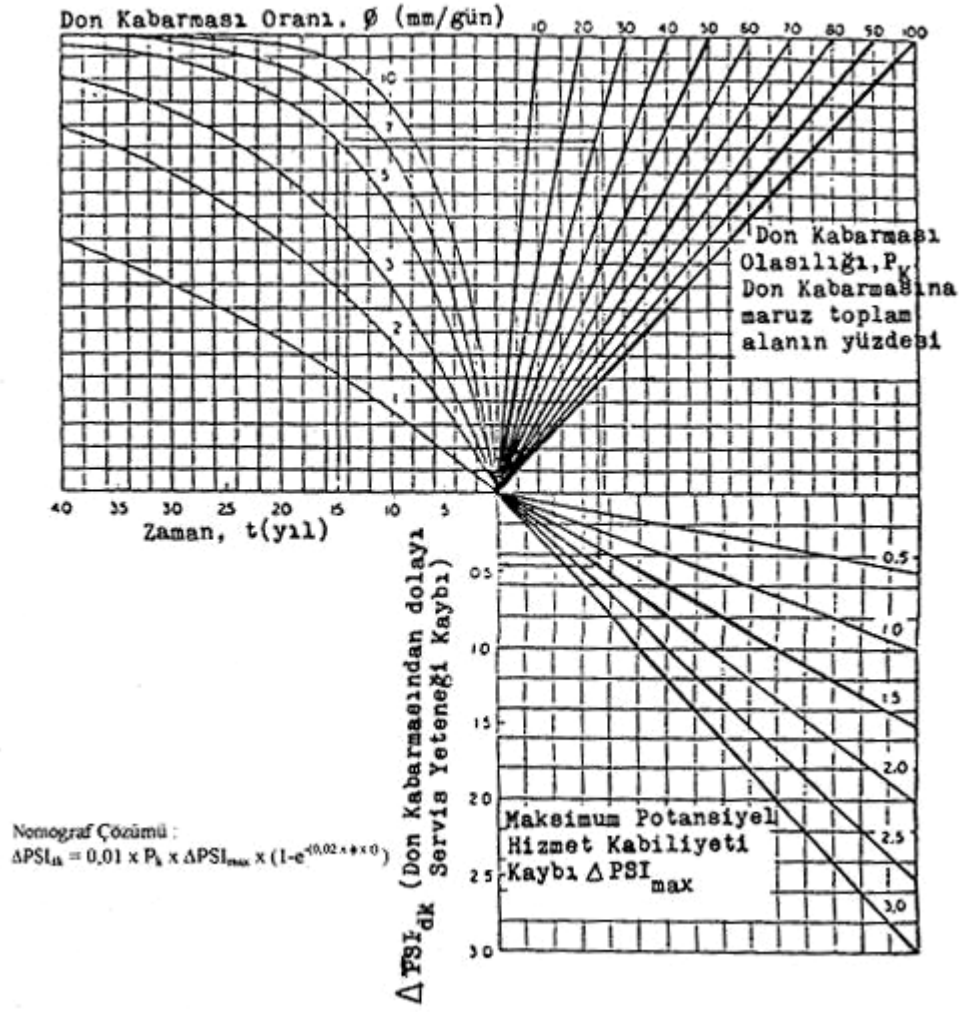
$\Delta \text{PSI}_{\text{şişme}}$ = Taban zemini şişmesi nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

$\Delta \text{PSI}_{\text{don kabarması}}$ = Don kabarması nedeniyle hizmet yeteneği indeksindeki azalmadır.



Şekil 2.6: Taban Zemininin Şişmesinden Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_s) İçin Grafik.

Hizmet yeteneğinde taban zemini şişmesinden dolayı meydana gelecek azalmayı hesaplayabilmek için, şişme oranı sabiti (θ), potansiyel düşey yükselme (V_R) ve şişme olasılığı (P_s) bilinmelidir. Hizmet yeteneğinde taban zemini şişmesinden dolayı meydana gelecek azalma (ΔPSI_s), bu parametrelere bağlı olarak ve performans periyodu için, Şekil 2.6 veya şeklin nomograf çözümü ile tayin edilmektedir [6].



Şekil 2.7: Don Kabarmasından Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_{DK}) İçin Grafik.

Benzer şekilde, don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde meydana gelecek azalmayı hesaplayabilmek için, Don kabarması oranı (ϕ), maksimum potansiyel hizmet yeteneği kaybı (ΔPSI_{max}) ve Don Kabarması Olasılığı (P_k) bilinmelidir. Hizmet yeteneğinde don kabarmasından dolayı meydana gelecek azalma, bu parametrelere bağlı olarak ve performans periyodu için, Şekil 2.7 veya şeklin nomograf çözümü ile (ΔPSI_{DK}) tayin edilmektedir [6].

Gerekli Üstyapı Kalınlığının Belirlenmesi

Tabaka kalınlıkları ve kombinasyonu SN değerinden yararlanılarak bulunmaktadır. Aşağıdaki eşitlik, SN değerinin kaplama, temel ve alt temel tabakalarının kalınlık hesabında kullanılmaktadır [6, 7].

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_1 + a_3 D_3 m_2 \quad (2.24)$$

veya;

$$SN = \sum_{i=1}^{i=k} a_i D_i + \sum_{j=1}^{j=n} a_j D_j m_j \quad (2.25)$$

Burada;

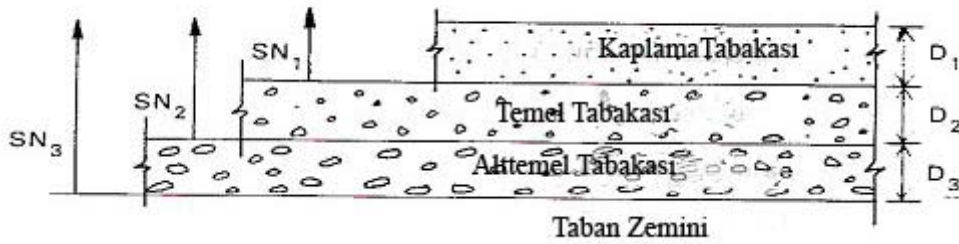
k = Bitümlü sıcak karışım tabakaları sayısı,

n = Granüler tabaka sayısı,

m_j = Granüler tabakalar için drenaj katsayısı,

a₁, a₂, a₃ = Sırasıyla kaplama, temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları,

D₁, D₂, D₃ = cm. cinsinden sırasıyla kaplama, temel ve alt temel tabaka kalınlıklarıdır.



Şekil 2.8: Tabaka Analizi İle Tabaka kalınlıklarının Belirlenmesi

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (2.26)$$

$$SN_1^* = a_1 x D_1 \geq SN_1 \quad (2.26a)$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2} \quad (2.26b)$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2 \quad (2.26c)$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 + (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3} \quad (2.26d)$$

2.2.1.3 AASHTO 2002 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

Bu bölümde, AASHTO 2002 Üstyapı Tasarım Yöntemi, kapsamı nedeniyle ayrıntılı olarak anlatılmamış olup, yalnızca bu yöntemde, AASHTO 1993 yöntemine yapılan ilave hususlar ve gelişmelere değinilmiştir [11].

AASHTO 2002 Üstyapı Tasarım yöntemi, AASHTO 1993 yönteminden daha detaylı bir çalışma ile elde edilmiştir. Bunun için, yalnızca bir bölgede değil, değişik bölgelerde oluşturulan ve uzun süreli gözlemlerin yapıldığı deney yolu ile analiz yapılmıştır. AASHTO 2002 yöntemi, AASHTO 1993 yönteminden farklı olarak, değişik girdi seviyeleri için yeni yaklaşımlar sunmaktadır. AASHTO 2002 yöntemi, tasarımda, detaylı verilerin yanında, ampirik formüllerin de kullanılmasını sağlamaktadır [11].

AASHTO 2002 yönteminde, uzman sistem yaklaşımı (Expert Systems) kullanılmıştır.

AASHTO 2002, modifiye malzemelerin (özellikle SUPERPAVE' den sonra) kullanılmasına imkan sağlamıştır [11].

Çevre etkileri, EICM ile daha detaylı olarak tasarımda kullanılmıştır. Tasarım Rehberinde Geliştirilmiş Entegre İklim Modeli (EICM), bir üstyapının tasarım ömrü boyunca, üstyapının ve tabanın değişen nem ve sıcaklık profillerini bütün yönleriyle ele alan bir iklim modelleme aracı olarak tanımlanmaktadır. EICM, tek boyutlu birleşik ısı ve nem akışı programıdır. Bu, yol işletiminin bütün yılları boyunca iklim koşullarıyla bağlantılı olarak üstyapıların ve taban zemini malzemesinin davranışı ve özelliklerindeki değişikliklerin benzetimini yapar [11].

AASHTO 2002' de, tasarımda, taşıt kompozisyonu, aks açıklıkları ve tekerlek lastiği özellikleri de dikkate alınmıştır. Tasarımda ayrıca Yol Geometrik Düzgünlüğü (IRI) de dikkate alınan bir parametre olmuştur [11].

2.2.2 Asfalt Enstitüsü Yöntemi

Bu tasarım yöntemi, üstyapı tasarım yöntemleri arasında, tümüyle asfalt karışımı üstyapıya dayanan tek yöntemdir. Bu yöntemde, bitümlü tabakaların kalınlığının

fazla olması sebebiyle, daha yüksek taşıma gücü ve yük yayma kabiliyeti sağladığından, diğer tip esnek üstyapılara nazaran daha az kalınlıkta üstyapıya ihtiyaç duyulmaktadır [12].

Burada Asfalt Enstitüsünün 1991 yılındaki en son yönteminden bahsedilecektir. Bu yöntemde, üstyapı tasarımı için bazı abaklar geliştirilmiş, ayrıca bu yöntemde, tam derinlikli üstyapı, asfalt emülsiyonu temel tabakası üzerine asfalt betonu kaplama tabakası ve granüler temel tabakası üzerine asfalt betonu kaplama tabakası olarak üç tip üstyapı önerilmiştir.

Bunun dışında bu yöntemde, yorulma ve kalıcı deformasyonu esas alarak, abaklar geliştirilmiş olup, zemindeki ve temel tabakasındaki mevsimsel ısı ve nem değişiminin etkisi de dikkate alınmaktadır.

Tasarımda, trafiğin etkisi, AASHTO tasarım yöntemlerinde olduğu gibi standart, 8,2 ton tek dingil yükü tekrar sayısı olarak hesaba katılmış ve SN=5 ve Pt= 2.5 için Ek-1 de verilen Taşıt Eşdeğerlik Faktörü tabloları kullanılmaktadır. Ayrıca, trafik ve dingil yükleri ile ilgili detaylı veri yoksa, Asfalt Enstitüsü tarafından yol tipine göre ETDY değerleri Tablo 2.8' deki gibi önerilmiştir.

Bu yöntemde taban zemini esneklik modülü, M_R kullanılmaktadır. Yol boyunca yeterli sıklıkta alınan zemin numunelerine esneklik modülü testi uygulanarak,

$\leq 10^4$ ETDY için %60'a tekabül eden M_R değeri,

$10^4 < \text{ETDY} < 10^6$ için %75'e tekabül eden M_R değeri

$\text{ETDY} \geq 10^6$ için % 87.5'e tekabül eden M_R değeri tasarım esneklik modülü değeri olarak saptanmaktadır.

Ayrıca, tasarım abakları zeminin donma sırasında yüksek M_R , çözülme sırasında ise, düşük M_R değerini dikkate almaktadır. Ortalama yıllık hava sıcaklığı 7^0 , 15.5^0 ve 24^0 ayrı ayrı verilmiştir. Tasarım abakları, Şekil 2.9'dan 2.14'e kadar verilmiştir.

Tablo 2.8: Trafik Sınıflandırması (Asfalt Enstitüsü)

TRAFİK SINIFI	YOL TİPİ	TASARIM SÜRESİNDEKİ AĞIR KAMYON ⁽¹⁾	ETDY
I	Park sahası, kentiçi düşük trafik hacmi	<7000	5x10 ³
II	Kentiçi yollar, 3. sınıf kentiçi yollar	7000-15.000	10 ⁴
III	Kentiçi toplayıcı yollar, 2. sınıf kentiçi yollar	70.000-150.000	10 ⁵
IV	Kentiçi küçük arterler, 1. sınıf kentiçi yollar	700.000-1500.000	10 ⁶
V	Kentiçi otoyol, bölünmüş yol, kentiçi ana arterler	2.000000-4500.000	3x10 ⁶
VI	Kentiçi ana arterler, kentiçi endüstri yolları	7.000.000-15.000.000	10 ⁷

⁽¹⁾Ağır kamyon için tandem dingilli kamyonlar esas alınacak.

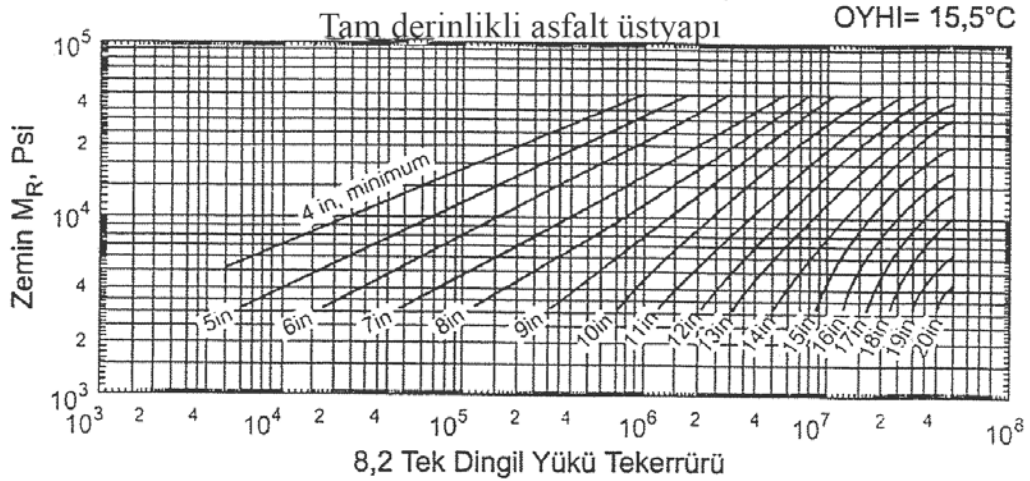
Aşağıda verilen abaklarda temel tabakasının asfalt emülsiyonu ile yapılması halinde;

Tip I : Yoğun tane dağılımlı agrega ile plentte karışım

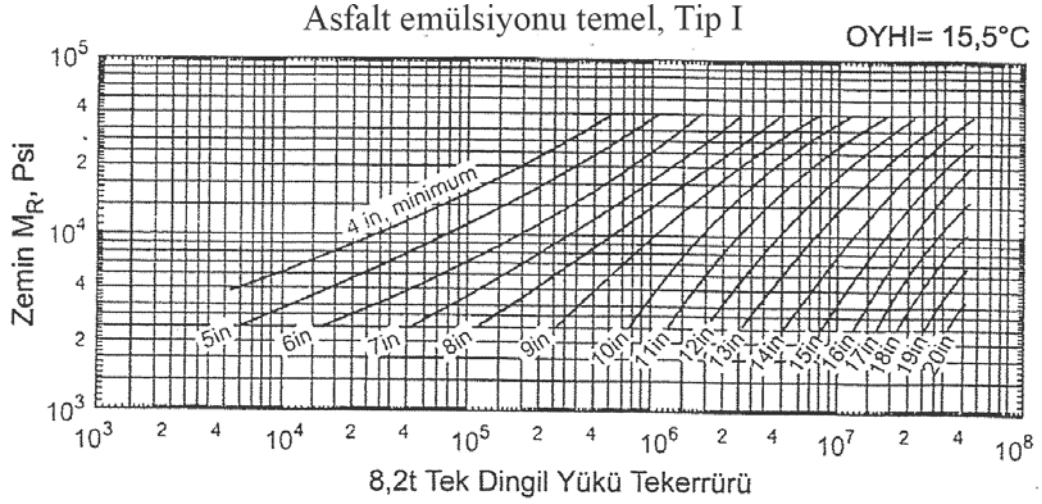
Tip II : Yarı işlenmiş kırmataş, dere malzemesi v.b agrega ile karışım

Tip III : Kumlu ve siltli kum karışımı

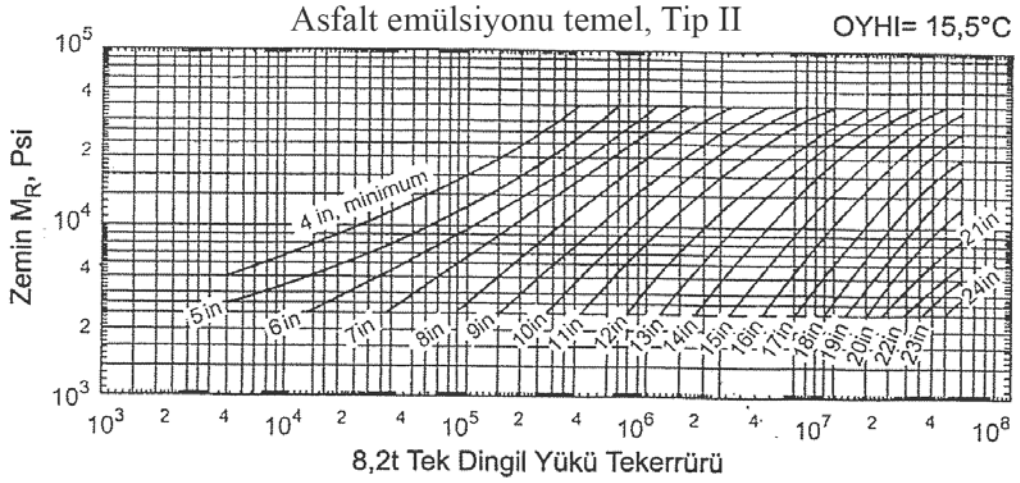
olarak göz önüne alınmaktadır.



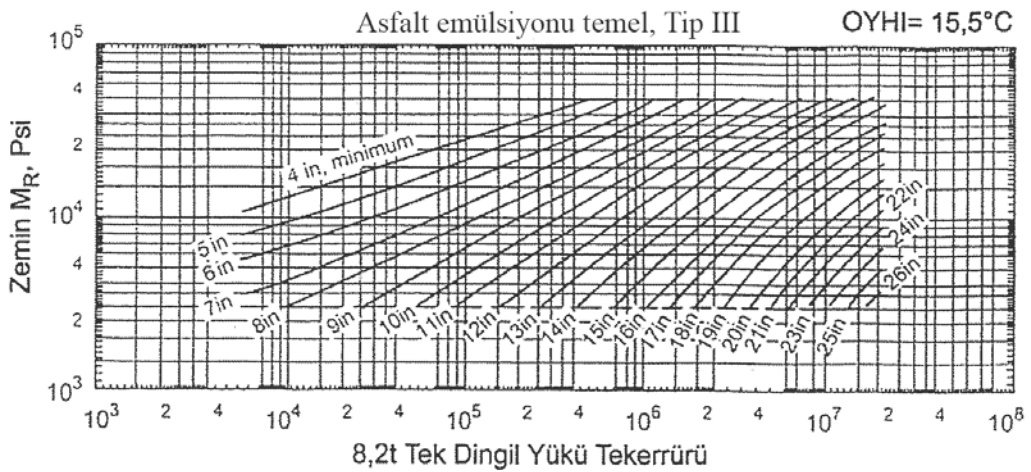
Şekil 2.9: Tam Derinlikli Asfalt Üstyapı (Asfalt Enstitüsü)



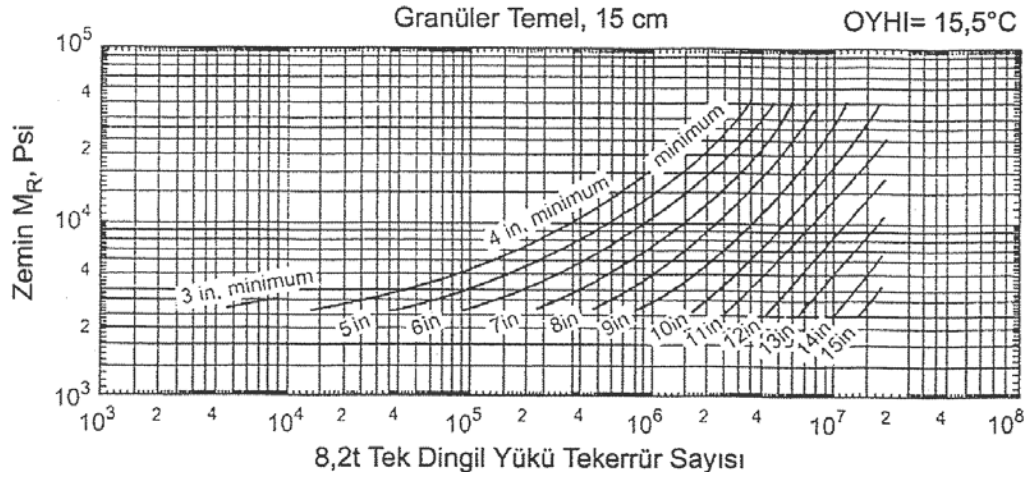
Şekil 2.10: Tip I, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)



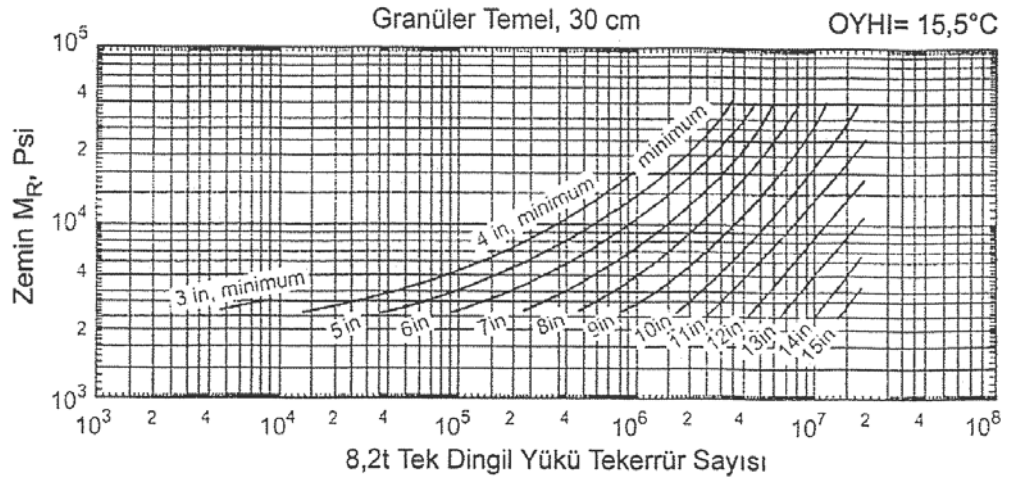
Şekil 2.11: Tip II, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)



Şekil 2.12: Tip III, Asfalt Emülsiyonu Temel (Asfalt Enstitüsü)



Şekil 2.13: 15 cm (Taneli) Temel Tabakası (Asfalt Enstitüsü)



Şekil 2.14: 30 cm (Taneli) Temel Tabakası (Asfalt Enstitüsü)

Tablo 2.9: Asfalt Emülsiyonu Temel Tabakası Üzerindeki Minimum Asfalt Aşınma Tabakası (Asfalt Enstitüsü)

TRAFİK ETDY	TİP I	TİP II VEYA III
10^4	1 inç	2 inç
10^5	1.5 inç	2 inç
10^6	2 inç	3 inç
10^7	2 inç	4 inç
$<10^7$	2 inç	5 inç

Asfalt Enstitüsü Yöntemi ile Tasarım Örneği

Problem, $ETDY = 2 \times 10^6$ ve $M_r = 280 \text{ kg/cm}^2$ (4000 psi) ise tam derinlikli, Tip I asfalt emülsiyonu temel ile ve 30 cm (12 inç) granüler temel ile yapılacak esnek üstyapının kaplama tabakası kalınlığının bulunmasıdır [12].

Şekil 2.9' dan, tam derinlikli asfalt kalınlığı 11,5 inç (29.21 cm) olarak bulunur. Şekil 2.10' dan, toplam kalınlık 10,5 inç (22.64 cm) olarak bulunur. Minimum asfalt kaplama kalınlığı 2 inç (5.08 cm) olacağı için, $10.5 - 2 = 8.5$ inç veya 22 cm asfalt emülsiyonu temel tabakası üzerine 5 cm aşınma tabakası yapılmalıdır. Şekil 2.14' den toplam kalınlık 9 inç (22.86 cm) bulunur. Minimum asfalt tabakası 2 inç (5.08 cm) olacağı için, bu durumda $9 - 2 = 7$ inç veya 18 cm kalınlıkta asfalt bağlayıcılı temel yapılmalıdır.

2.3 Analitik Yöntemler

Karayolu üstyapı tasarımında analitik yaklaşım, üstyapının diğer inşaat mühendisliği yapıları (binalar, köprüler, vs.) gibi düşünülerek tasarlanmasıdır. Temel işlem aşağıda açıklandığı şekildedir;

- a. Analizin basitleştirilmesi için gerçek yapının rasyonel bir şekilde yalınlaştırılması ve buna uygun bir şekil belirlenmesi;
- b. Yükün belirlenmesi;
- c. Tabaka kalınlıkları ve özelliklerinin belirlenmesi;
- d. Yapıdaki kritik noktalarda oluşan gerilme, şekil ve yer değiştirmelerin tespit edilmesi için yapısal analizlerin yapılması;
- e. Tasarımın uygun olup olmadığını belirlemek için, bu değerlerin maksimum izin verilebilen değerlerle karşılaştırılması;
- f. Tatmin edici bir tasarım elde edilinceye kadar c, d, ve e adımları tekrarlanarak malzeme özellikleri ve tabaka kalınlıklarının değiştirilmesi;
- g. Sonucun ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesi.

Teorik analizin uygulamaya yönelik çeşitli şekilleri bulunmaktadır. Bunlar Shell Pavement Design Manual (Shell Üstyapı Tasarım Kılavuzu) gibi grafiklere dayalı olanlar ve Nottingham Üniversitesi'nin geliştirdiği gibi, bilgisayar programları yardımıyla kullanılabilenlerdir [2].

1963 yılında Shell, esnek üstyapı tasarımı ile ilgili laboratuvar deneyleri ve AASHTO Yol deneyi sonuçlarını kullanarak, tasarım grafikleri hazırlamıştır. Bunlar, daha sonra, 1978 yılında tasarım paketi, malzeme özellikleri, trafik yüklemesi ve sıcaklıkla ilgili parametrelerle güncellenmiş ve 1985'te genişletilerek son halini almıştır [11]. Shell Esnek Üstyapı Tasarımı, analitik üstyapı tasarım yöntemleri için iyi bir örnek olma özelliği taşımaktadır.

2.3.1 Shell Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

1963 yılında Shell tarafından, esnek üstyapıların tasarımına yönelik, laboratuvar deneyleri ve AASHTO Yol Deneyi 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 güncelleştirilmiştir. Sonuçta ortaya Shell Üstyapı Tasarım Rehberi (SPDM 1978) çıkmıştır. 1985' te yapılan çeşitli eklemelerle de SPDM 1978'in güncelleştirilmesi yapılmıştır [13].

Shell Üstyapı Tasarım Rehberinde üstyapı, bilgisayar yardımıyla analiz edilmesine rağmen, bu elkitabı, tasarım yöntemini ayrıca grafikler, şekiller ve tablolar halinde sunmaktadır. Elkitabı, mevcut taban zemini üzerinde bulunan, taneli tabaka üzerine bitümlü kaplamalardan oluşan üç tabakalı bir üstyapıyı göz önüne almaktadır [2].

Yöntemin esası, üstyapıya uygulanan trafik yüklemesi sonucu, alt temel ile zemin arasında aşırı deformasyon oluşumunu ve bitümlü tabakada yapısal çatlak oluşmasını önleyecek asfalt tabakayı tasarlamaktır. 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 [13].

Yöntemde malzemeler, Young Elastisite Modülü ve Poisson Oranı ile karakterize edilmiştir [13].

SDPM 1978 % 2' den % 30' a kadar olan CBR değerleriyle alt temel özelliklerini göz önünde bulundurularak ve asfalt karışımın 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 [14].

Tasarım Verileri

Shell esnek üstyapı tasarımında; çevresel koşullar (sıcaklık, nem, rüzgar), yükleme koşulları (dingil yükleri, yük dağılımı, temas gerilmesi, temas yüzey alanı, yükleme süresi, dinamik etkiler) ve malzeme özellikleri (modüller, Poisson oranı, bozulma ölçütleri) ve tasarım süresi, esas alınan tasarım parametreleridir.

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. Diğer dingil yüklerinden (L) dönüştürme işlemi aşağıdaki formülle standart dingil yükü eşdeğer sayısı (n) hesaplanarak yapılır [13].

$$n = 2.4 \times 10^{-8} \times L^4 \quad (2.27)$$

Bu formülde (L) kN cinsindedir. Bağlantı AASHTO Yol deneyinden elde edilen yük eşdeğerliliği faktörlerine dayanır.

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 [12].

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 [14].

Malzeme Özellikleri

Zemin Modülünün, gerçek trafiği temsil eden yükler altında dinamik defleksiyon ölçümleriyle belirlenmesi uygun olmaktadır. Bu tip imkanların ve verilerin mevcut olmadığı durumlarda CBR değeriyle dinamik zemin modülü (E_3) arasındaki ampirik bağıntı kullanılabilir [13].

$$E_3 = 10^7 \times \text{CBR} \text{ (N/ m}^2 \text{)} \quad (2.28)$$

Zeminde olduğu gibi, granüler temel tabakalarının modülleri de büyük oranda gerilmeye bağlıdır. Teorik analizle desteklenen saha ölçümleri bağılayıcısız temel tabakası modülünün (E_2) temel tabakasının kalınlığına (h_2) ve altındaki zeminin modülüne (E_3) bağlı olduğunu, (2.29) ifadesi ile göstermiştir [13].

$$E_2 = k_2 \times E_3 \quad (2.29)$$

$$K_2 = 0.2 \times h_2^{0.45}, \quad (2 < k < 4 \text{ ve } h_2 \text{ ' nin birimi mm ' dir. })$$

Çimentolu temellerin Elastisite modülü üstyapıdan kesilen örneklerle laboratuvarında dinamik eğilme deneyleri vb. uygulanarak bulunabilmektedir [14]. Tasarımda kullanılacak tipik kum çimento modülü değerleri (E), $5 \times 10^9 - 10^{10}$ N/ m^2 aralığında alınmıştır. Bu değerler, dalga yayılımı ölçümlerinden elde edilen değerlerle yaklaşık aynıdır [13].

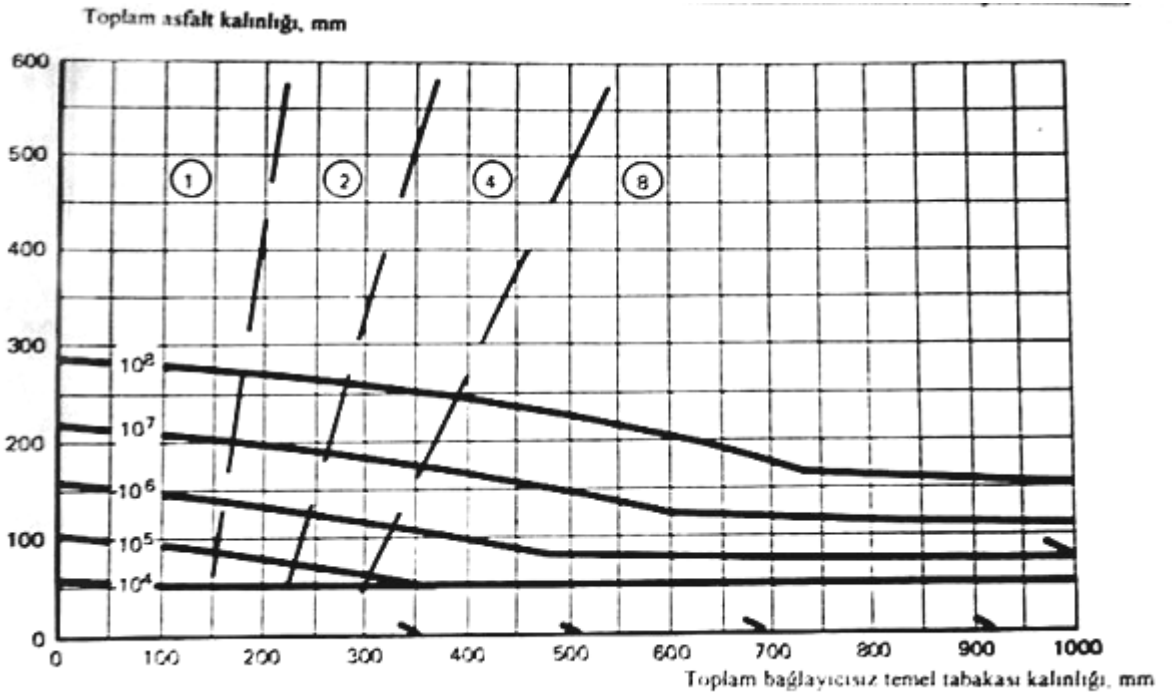
Asfalt karışımının rijitlik modülünün değeri 10^6 ile 5×10^{10} N/ m^2 arasında değişir. Rijitlik değerlerinin üst aralığı ($10^8 - 5 \times 10^{10}$ N / m^2) çok sayıda asfalt karışımı için dinamik veya yarı statik (örn. Sabit yükleme oranı) deneylerle çeşitli sıcaklıklar ve farklı yükleme şartları için belirlenmiştir. Bulunan modülün yalnızca bağılayıcı içeriğine, bağılayıcının rijitliğine ve karışımdaki boşluklara bağlı olduğu görülmüştür [13]

Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı malzemeler için bir dizi Poisson Oranı (ν) değeri verilmiştir. Poisson Oranı gerilme, sıcaklık, vb. faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bununla birlikte Poisson Oranı'ndaki değişmelerin, birincil tasarım parametreleri (maksimum zemin basınç deformasyonu, maksimum asfalt çekme deformasyonu) üzerindeki etkisi azdır. Kısa süreli yüklemeler için asfaltın Poisson Oranı $\nu = 0.35$ civarında bulunmuştur. Granüler temel malzemesi ve zemin için de

aynı değer alınabilmektedir. Çimentolu temel için $\nu = 0.25$ değeri kullanılmaktadır [14]

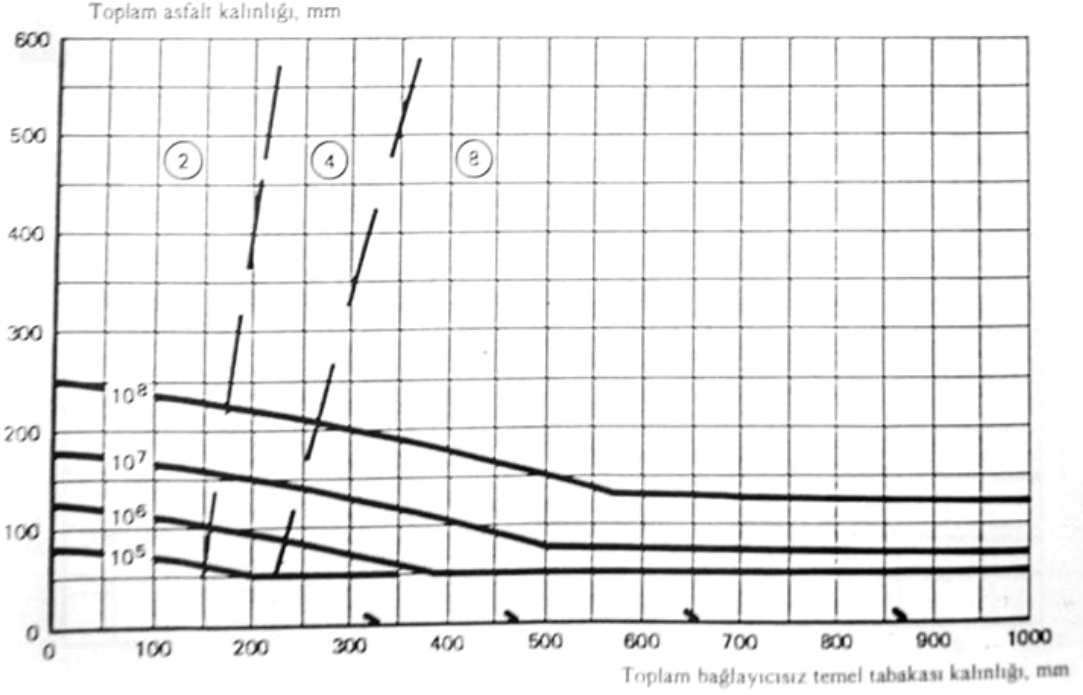
Tasarım Grafikleri

Shell tasarım grafiklerinin ilk hali (1963), gerekli asfalt betonu kaplama tabakası kalınlığını, verilen zemin modülü ve granüler temel tabakası kalınlığının bir fonksiyonu olarak veren eğrileriyle uygulamada kullanmak açısından uygun bulunmaktadır. Yeni sistemde hava sıcaklığı (ağırlıklı yıllık ortalama hava sıcaklığı, MAAT) ve karışım tipiyle ilgili yeni parametreler de göz önünde bulundurularak çizelge sayısı artırılmıştır [14]. Şekil 2.15' ten, 2.18 'e kadar farklı MAAT değerleri ve zemin modülleri için tipik tasarım eğrileri verilmiştir.

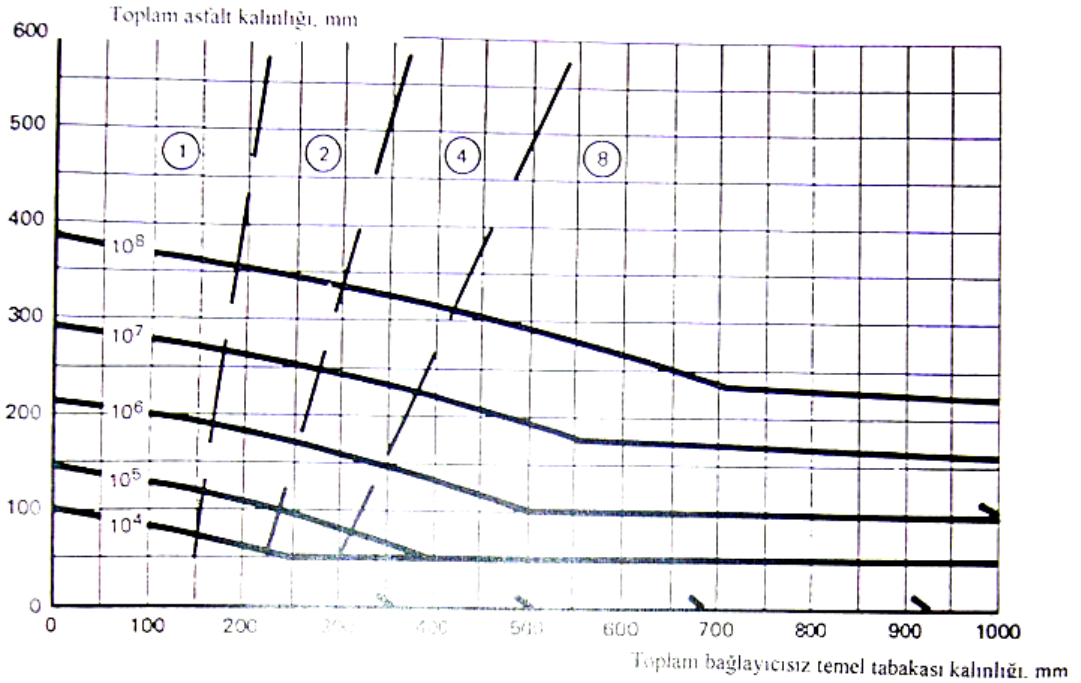


Şekil 2.15: Üstyapı Kalınlığının eşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması

ESDY Sayısı: değişken, Zemin Modülü : $2,5 \cdot 10^7$ - MAAT : 12°C



Şekil 2.16: Üstyapı Kalınlığının Çeşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması
 ESDY Sayısı: değişken, Zemin Modülü : $5,0 \cdot 10^7$ - MAAT : 12°C



Şekil 2.17: Üstyapı Kalınlığının Çeşitli N (ESDY) Değerleri için Hesaplanması
 ESDY Sayısı: değişken, Zemin Modülü : $2,5 \cdot 10^7$ - MAAT : 20°C

3. KARAYOLU RİJİT ÜSTYAPI TASARIMI

Rijit üstyapı olarak tanımlanan beton üstyapı, Portland çimentosu bağlayıcılıdır ve üstyapı ile alt temel arasında temel tabakası içermeyebilir.

Beton yolların projelendirilmesinde amaç, analiz süresi boyunca, üzerinden geçen trafiği büyük deformasyonlara ve çatlamalara maruz kalmadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek beton plağın ve diğer tabakaların kalınlıklarının belirlenmesi ve üstyapıda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin saptanmasıdır [15].

Çimento betonu yol üstyapılarında, yüksek elastisite modülü ve rijitliğinden dolayı, tekrarlı yükler taban zemini üzerine oldukça geniş alana yayılmaktadır. Böylece yapısal kapasitenin esas bölümünü beton plak sağlamaktadır. Esnek üstyapılarda bunun tam tersi olarak; alt temel, temel ve kaplama tabakaları birlikte yapısal kapasiteyi oluşturmaktadır [15].

Yük taşıma kapasitesinin tümünü beton plak karşıladığı için, rijit üstyapıların tasarımında esas faktör beton plağın dayanıklılığıdır. Bu nedenle, alt temel veya temeldeki küçük değişimlerin üstyapının yapısal kapasitesine çok az etkisi bulunmaktadır. Beton kaplamalarda, kaplama ile taban zemini arasındaki tabaka, temel ya da alt temel tabakası olarak kullanılmaktadır [5].

Temel tabakası rijit üstyapılarda kullanıldığında çoğunlukla alt temel ismi almaktadır. Temel tabakası tasarımda; (1) pompaj olayının kontrolü, (2) don etkisinin kontrolü (3) drenaj, (4) alt temel de şişme-büzülme olayının kontrolü amaçları ile kullanılmaktadır.

Pompaj olayının bazı anayollar için kritik hale gelmesi ile, taban zemininin dayanımını azaltmasını önlemek için, rijit plaklar çeşitli kalınlıkta taneli temel tabakaları üzerine inşa edilmiştir. Pompajı oluşturan birçok faktör ile ilgili çeşitli

çalışmalar yapılmış ve pompajı önlemek için temel tabakası tasarım kriterleri geliştirilmiştir [5].

Karayolu rijit üstyapıları da esnek üstyapılarda olduğu gibi, ampirik, ampirik-analitik ve analitik yöntemler kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu bölümde, ampirik tasarım yöntemleri için AASHTO 1972 rijit üstyapı tasarım yöntemi ve PCA (1966) (Portland Çimentolar Birliği) Yöntemi, ampirik-analitik yöntemler için, AASHTO 1986 Yöntemi ve PCA (1984) yöntemi örnek olarak açıklanmıştır.

Üç tip beton üstyapı tanımlanmıştır [5];

1- Donatısız derzli basit beton üstyapı (JPCP)

2- Derzli donatılı beton üstyapı (JRCP)

3- Sürekli donatılı beton (Betonarme) üstyapı (CRCP)

Derzli donatısız beton üstyapı (JPCP) çatlak kontrolü ve yük transferi için çelik içermemektedir (boyuna derzler hariç). Bu tip üstyapının oldukça yakın aralıklı genişleme derzleri içermesi gerekmektedir. Basit beton üstyapı her ne kadar “çelik içermez” olarak tanımlansa da, çelik bağlantı çubuğu genellikle boyuna derzlerde açılmaları önlemek ve sistemin mafsalı derz olarak çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Bazen ilave olarak kayma demirleri de kullanılmaktadır.

Derzli donatılı beton üstyapılar geniş aralıklı genişleme derzleri içermekte ve kural olarak, derzlerde, yük transferinin sağlanması için kayma demirleri kullanılmaktadır. Çelik hasır, kayma demirlerinden bağımsız olarak kullanılmaktadır.

Sürekli donatılı beton üstyapılar yüksek oranlarda (% 0,6 ve fazlası) çelik içermektedir. Bunlar, inşaat derzi ve az sayıda genişleme derzi haricinde derz içermemektedir.

Beton plağın üstyapının esas bileşeni olmasıyla birlikte, beton üstyapıdaki gerilmeler birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak verilmiştir. Üstyapıdaki gerilmeler temel ve alt temeldeki hacimsel değişiklikler, sıcaklık değişimleri, su içeriğinin değişimi ve dingil yükleri gibi, çeşitli sebeplerin sonucu olabilmektedir.

Teorik olarak verilen gerilme değerleri statik yükler içindir. Bunların, tasarım uygulanabilirliği için, tekrarlı yüklere göre modifiye edilmesi zorunludur. Tekrarlı yükler ile meydana gelen yorulma değerinin, beton üstyapı tasarımında dikkate alınması gerekmektedir. PCA tasarım yöntemi, betonun yorulma karakteristiklerine bağlıdır.

3.1 Ampirik Yöntemler

3.1.1 AASHTO 1972 Rijit styapı Tasarım Yöntemi

Bu yöntemde, beton plağın kalınlığının belirlenmesinde, AASHTO yol deneyinden yararlanılarak hazırlanan ve üstyapıya etkiyen faktörleri içeren aşağıdaki ‘‘AASHTO Deney Yolu Denklemi’’ veya denklemin nomograf çözümlerini veren Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 deki abaklar kullanılmaktadır [15].

Son Hizmet Yeteneği İndeksi, $P_t=2,0$ için Deney Yolu Denklemi;

$$\log W_{t8.2} = \log W_{8.2} = 7,35 \log (d+1) + \frac{G_t}{\beta} - 0,06 + 3,58 \log \left[\frac{S_c (d^{0.75} - 1.132)}{690 \left(d^{0.75} - \frac{18.416}{Z^{0.25}} \right)} \right] \quad (3.1)$$

Son Hizmet Yeteneği İndeksi, $P_t=2,5$ için Deney Yolu Denklemi;

$$\log W_{t8.2} = \log W_{8.2} = 7,35 \log (d+1) + \frac{G_t}{\beta} - 0,06 + 3,42 \log \left[\frac{S_c (d^{0.75} - 1.132)}{690 \left(d^{0.75} - \frac{18.416}{Z^{0.25}} \right)} \right] \quad (3.2)$$

Şeklindedir. Bu ifadelerde;

t: Analiz süresi,

W_t veya $W_{8.2}$ = Analiz sresindeki eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı ,

d = Kaplama plağının kalınlığı, in

$S_c =$: Betonun eğilme direnci (psi) 28 günlük.,

$E_c =$ Betonun elastisite modülü (psi),

$K =$ Taban zemininin yatak katsayısı (psi/inç, pci),

$G_t = t$ analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksindeki kaybın, $P_t = 1.5$ alınmasına karşılık gelen toplam potansiyel kayba oranının logaritmik fonksiyonudur.

$P_0 =$ Üstyapının başlangıçtaki hizmet yeteneği indeksi (rijit deneme yolu için bu değer 4,5 tur.)

$P_t =$ Analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksidir.

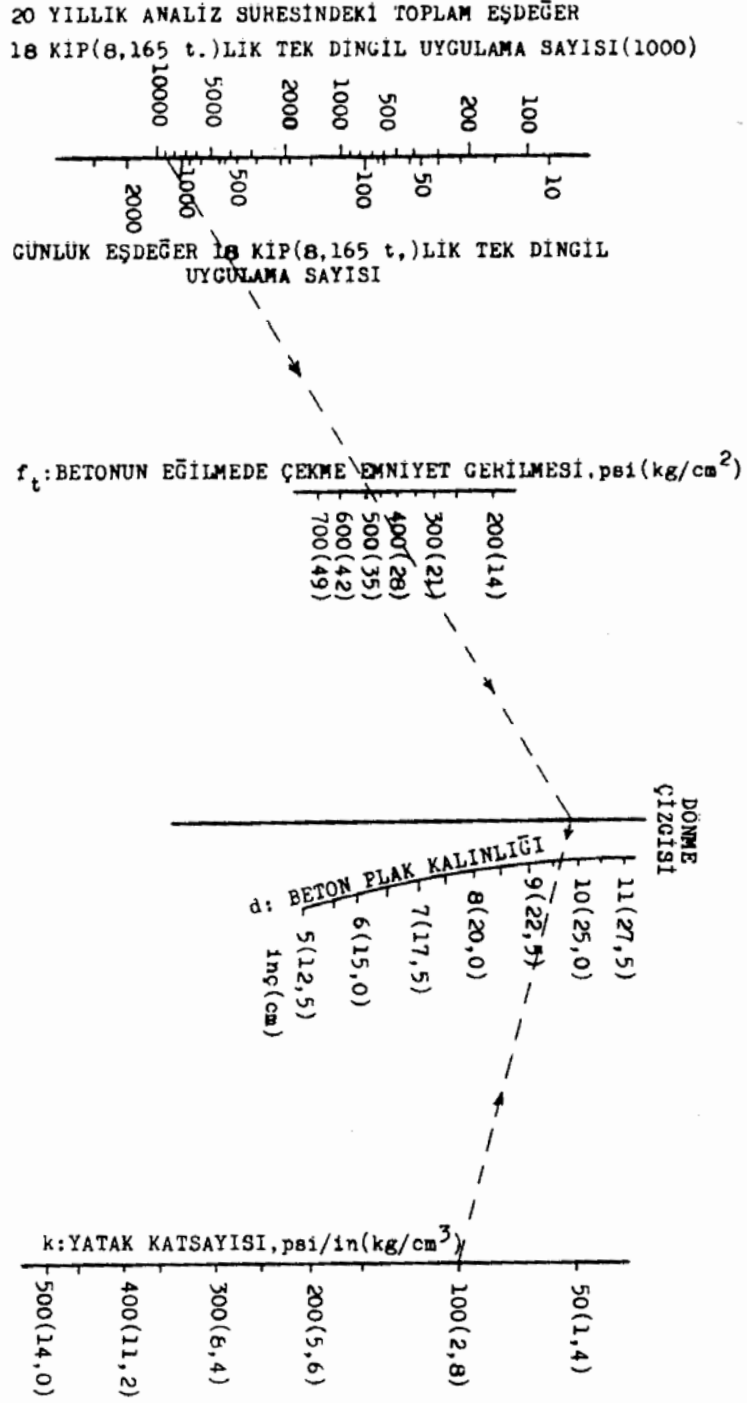
$\beta =$ analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksidir. (P_t) yi ($W_{t8.2}$) ye bağlayan hizmet yeteneği eğrisini etkileyen proje ve yük değişkenlerinin fonksiyonudur.

$\rho =$ Proje ve yük değişkenlerinin bir fonksiyonu olup hizmet yeteneği indeksinin 1,5 olmasına karşılık geleceği umulan dingil yükü uygulama sayısıdır.

Tasarım aşağıdaki adımları kapsamaktadır;

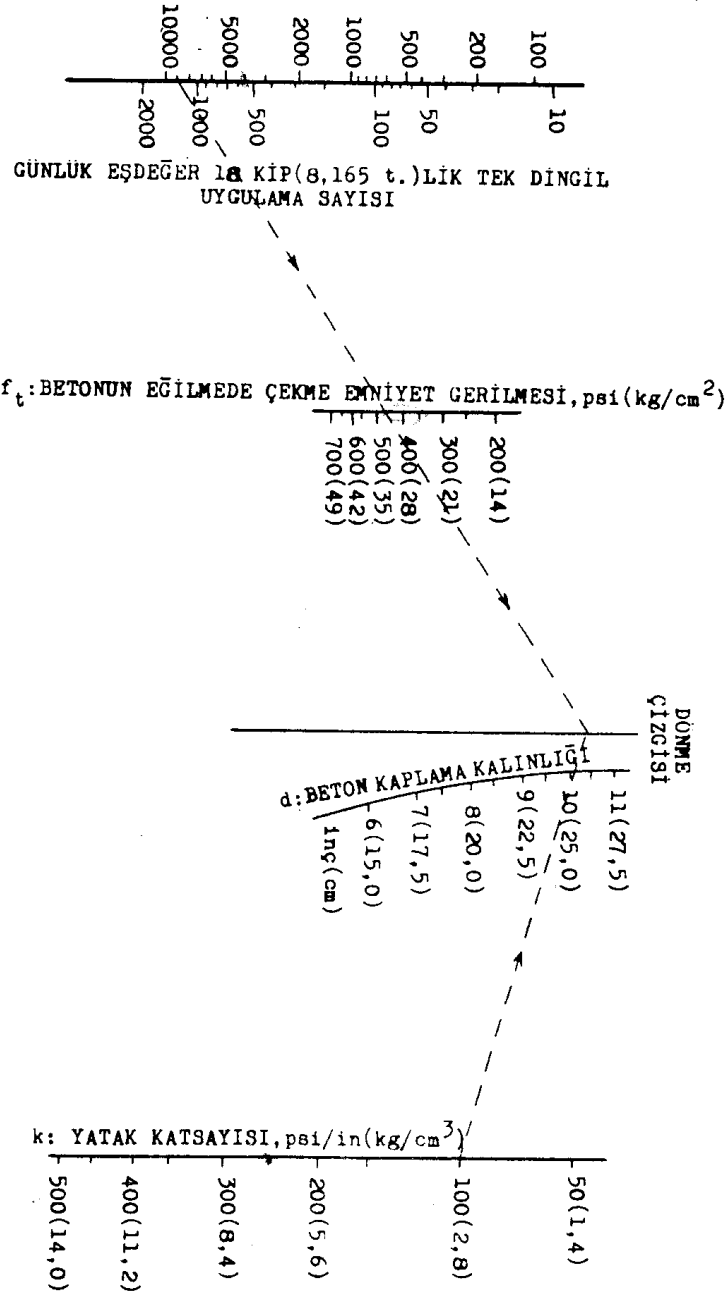
- Son hizmet yeteneği indeksi(P_t) seçilir.
- Trafik analiz süresi seçilir.
- Proje trafiği hesaplanır.
- Taban zemininin yatak katsayısı (k) saptanır ve son olarak
- Betonun eğilmedeki çekme emniyet gerilmesi (f_t) seçilir.

Trafik analizi, proje trafiğinin hesaplanması, son hizmet yeteneği indeksinin seçimi esnek üstyapıların üstyapı tasarımındaki farklı bulunmamaktadır. Tüm bu projelendirme parametreleri belirlendikten sonra, yukarıda verilmiş olan eşitlikler yardımıyla ya da, Şekil 3.1 ve 3.2' de verilen abaklar yardımıyla gerekli plak kalınlığı bulunmaktadır [15].



Şekil 3.1: Rijit Üstyapılara Ait Projelendirme Abağı, $P_t = 2.0$

20 YILLIK ANALİZ SÜRESİ İÇİNDEKİ TOPLAM EŞDEĞER
18 KİP(8,165 t.)LİK TEK DİNGİL UYGULAMA SAYISI(1000)



E_c : 4.200.000 psi

Şekil 3.2: Rijit Üstyapılara Ait Projelendirme Abağı $P_t = 2.5$

Efektif Zemin Yatak Katsayısı (k)

Esnek üstyapılarda zemin taşıma gücü efektif esneklik modülü (M_R) ile tanımlanırken, rijit üstyapılarda ise, zeminin taşıma gücü efektif yatak katsayısı (zemin reaksiyon modülü) ile tanımlanmaktadır [14].

Beton plağın oturacağı taban zemininin taşıma gücü, Westergaard'ın belirttiği yöntemle ölçülmektedir. Bu yöntemde, tabanlar, 'k' değerine göre değerlendirilmektedir. 'k' değeri bir yük altında, birim alana gelen yükün taban reaksiyonunun, o noktada oluşan deformasyona (çökmeye) oranı olarak ifade edilmektedir [15].

Burada;

$$k = \frac{P}{Y} \quad (3.3)$$

P: Tabana gelen yük, taban reaksiyonu, (psi veya kg/cm),

Y: Çökme deformasyonu, (inç veya cm),

k: Yatak katsayısı (pci, psi/inç veya kg/cm²/cm) dır.

Tabanın taşıma gücü, zeminin cinsine, yoğunluğuna, nemlilik derecesine bağlı olarak birbirinden oldukça farklı sınırlar arasında değişebilmektedir. Örneğin, killi zeminler (plastik killer) için k değeri yaklaşık 50 iken, boşluksuz kumlu çakıllarda k değeri, 500 veya daha fazla olabilmektedir. İyi sıkışmış killer, kuru ve sert oldukları zaman daha yüksek k değeri vermektedir. Fakat killerin taşıma gücü değerleri nem oranlarındaki artışla beraber hissedilir derecede azalmaktadır. Taban zeminleri üzerinde yapılan incelemeler, kil karakterindeki taban zeminlerinin nem oranlarının en fazla plastik limitlerine yakın bir değere ulaştığını ve bunu koruduklarını göstermiştir. Bu nedenle, bu tip zeminin k değerinin, zemin plastik limitte ve ona yakın durumda iken belirtilmesi gerekmektedir. Bu durum kumlar ve çakıllar için söz konusu değildir. Çünkü nem değişimi bu tip malzemelerin taşıma gücünde çok az değişikliğe yol açmaktadır. Genel olarak taban zeminlerinin, üstyapı yapılmadan

önce “maksimum yoğunluk” elde edilinceye kadar, “optimum nem” de sıkıştırılması gerekmektedir [15].

Taban zemininin yük-defleksiyon ilişkisi lineer değildir. Taban zemini reaksiyon modülünün (efektif yatak katsayısı) birimi psi/inç(kg/cm³)tir. Taban zemini reaksiyon modülü, plaka yükleme deneyi ile tanımlanmaktadır. Bu deney uzun zaman almakta olup, özel durumlar haricinde karayolu üstyapı tasarımlarında nadiren gerçekleştirilmektedir [5]. k için tipik değerler Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1: Taban Zemini Reaksiyon Modülü Değerleri

ZEMİN TİPİ	K (PCI)
Plastik kil	50-100
Silt ve Siltli kil,	100-200
Kum, killi çakıl	200-300
Çakıl	300+

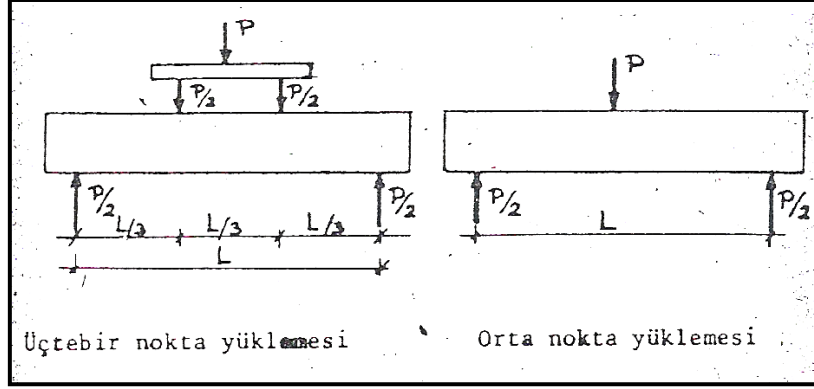
Plaka yükleme deneyinde, çelik bir plak, taban üzerinde yüklenmektedir. Yük ve çökme değerleri ölçülmektedir. Bu değerler birbirine oranlanarak, k yatak katsayısı değeri bulunmaktadır. Plaka yükleme deneyinin yapılmadığı hallerde, tabanın CBR değeri bulunmakta ve Şekil 3.3’ teki eğriden yaklaşık k değeri belirlenmektedir [15].

3.1.1.2 Betonun Eğilmede Çekme Emniyet Gerilmesinin (f_f) Bulunması

Beton yol üstyapı hesabı yapılırken, betonun “basınç” direncinden çok “eğilmede çekme” direnci veya “kırılma, kopma modülü” kullanılmaktadır. Bunun nedeni, beton plağın bir noktasına, kırılma oluncaya kadar kuvvet uygulandığında, kırılmanın önce çekmeye çalışan kısımlarda meydana gelmesidir. Çünkü beton, çekme direnci düşük bir malzemedir [15].

$$f_f = 0,75 S_c \quad (3.4)$$

S_c : Kopma modülü, Eğilme direnci



Şekil 3.3: Eğilme Direncinin Saptanması

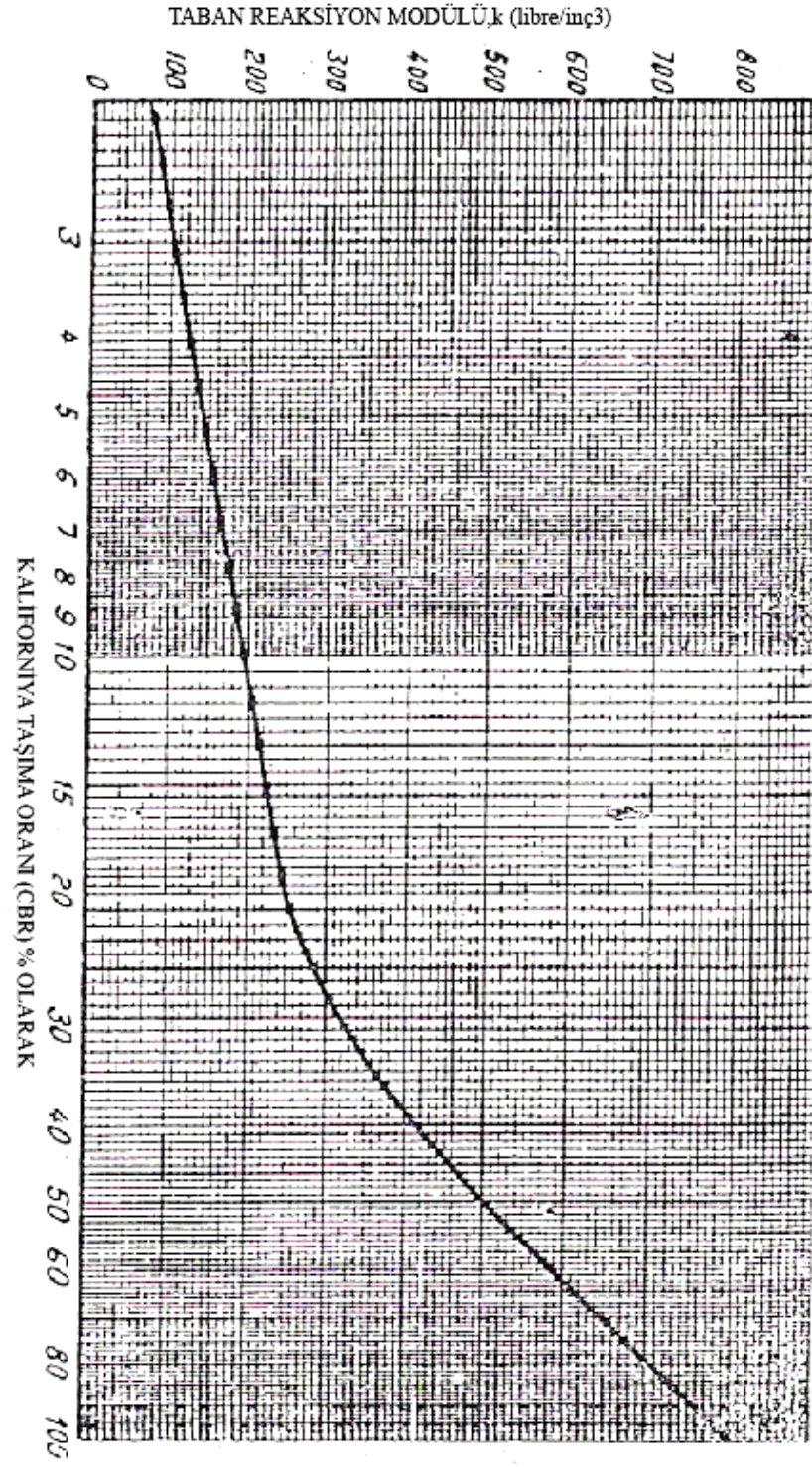
$$S_c = \frac{P.L}{b.h^2}$$

$$S_c = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}$$

b: kiriş genişliği

h: kiriş yüksekliğidir.

AASHTO yol deneyi için ortalama beton eğilme emniyet gerilmesi (28 günlük), 48 kg/cm² dir.



Şekil 3.4: CBR ile Taban Reaksiyon Modülü (k) Arasındaki Bağlantıyı Veren Eğri

3.1.2 Portland Çimentosu Birliği Yöntemi (1966)

Portland Çimentosu Birliği; Westergaard tarafından geliştirilen gerilme analizi tekniklerine bağlı beton yol üstyapı tasarımını önermiştir [16]. Bu tasarım yönteminde, üstyapı kalınlığı tekrarlı yük sayısı ve büyüklüğüne, kopma modülü ve taban zemini reaksiyon modülüne bağlıdır. 28 günlük kopma modülü değerleri, kalınlık tasarımı için kullanılmaktadır. Çok zayıf ve çok kuvvetli taban zemini karşılaştırılması dışında, beton yolların üstyapı kalınlık hesabı taban zemini reaksiyon modülüne çok duyarlı bulunmamaktadır. Daha önce bu modül için verilmiş değerler tasarımda kullanılabilirlerdir.

Portland Çimentosu Birliği yönteminde, yorulmayı ifade eden gerilme oranlarından yararlanılmaktadır. Gerilme oranları Tablo 3.2' de verilmiştir. Gerilme oranı 0,51'den küçük ise, sayısız yük tekrarı uygulanabilmektedir. Üstyapının maruz kalacağı gerçek dingil yükünün, tasarımda, güvenlik faktörü olarak % 20 oranda artırılması önerilmiştir [5].

Tablo 3.2: Gerilme Oranları ve İzin Verilebilir Yük Tekrar Sayısı (Portland Çimentolar Birliği)

GERİLME ^A ORANI	İZİN VERİLEBİLİR TEKRAR SAYISI	GERİLME ORANI	İZİN VERİLEBİLİR TEKRAR SAYISI
0.51 ^b	400.000	0.69	2500
0.52	300.000	0.70	2000
0.53	240.000	0.71	1500
0.54	180.000	0.72	1100
0.55	130.000	0.73	850
0.56	100.000	0.74	650
0.57	75.000	0.75	490
0.58	57.000	0.76	360
0.59	42.000	0.77	270
0.60	32.000	0.78	210
0.61	24.000	0.79	160
0.62	18.000	0.80	120
0.63	14.000	0.81	90
0.64	11.000	0.82	70
0.65	8.000	0.83	50
0.66	6.000	0.84	40
0.67	4.500	0.85	30
0.68	3.500		

^a Yük gerilmesinin kopma modülüne oranı

^b 0,50 ve daha az gerilme oranı için sınırsız tekrar sayısı

Gerilme oranı= f_f / S_c ,[14].

Burada;

f_f : Beton plakta trafik yükünden dolayı oluşan eğilme-çekme gerilmesi

S_c : Betonun kopma modülü (üç nokta yükleme deneyi) dür.

Trafik sınıflandırılmıştır; tasarım amacına göre, dingil yükleri ve üstyapı derinliği boyunca oluşan gerilmeler Şekil 3.5 ve 3.6'dan okunabilir. Her yük için izin verilebilir tekrar sayısı tanımlanmıştır. Bu değer, üstyapı ömrü boyunca tahmin edilen uygulama sayısı ile karşılaştırılmıştır.

Her yükün izin verilebilir tekrar sayısı yüzdesi tanımlanmış ve izin verilebilir tekrar sayısı yüzdelik toplamı bulunmuştur. Teorik olarak; toplam yüzdelik değer %100 ün altında ise, bu tasarım doğru kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu değer ciddi problemler oluşturmadan %125 oranlarına ulaşması mümkün bulunmaktadır. Ancak, bu toplamın daha yüksek değerlere ulaşması durumunda seçilen plak kalınlığı uygun değildir [16].

Beton üstyapılı yolların trafik analiz periyodu 20 yıldan daha az olmamak üzere, 30 ile 50 yıl alınabilmektedir. Genellikle bu süre 40 yıl olarak alınmaktadır. Trafik analiz periyodundaki trafik hacmi ve dingil yükü sayısının tahmin edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.5 ve 3.6' yı kullanarak, tasarım hesapları yapılabilmektedir. Bunun için, Tablo 3.3' de görüldüğü gibi, beton üstyapıyı kullanacak dingil yükleri 1. kolonda ve tasarım periyodunda tahmin edilen tekrar sayısı ise 6. kolonda verilmektedir. Dingil yükü verilerine göre, Şekil 3.5 ve 3.6' dan beton plaktaki gerilmeler bulunmakta ve yorulma hesapları yapılmaktadır. Fakat bunun için, alt temel üzerindeki k ve betonun kopma modülü, S_c değerlerinin bilinmesi ve tahmini beton plak kalınlığının önceden tahmin edilmesi gerekmektedir [14].

PCA (1966) Yöntemi ile Tasarım Örneği

Beton üstyapı tasarımı yapılacak yüksek standartlı bir yol için;

$$k = 100 \text{ pci (1,4 kg/cm}^3 \text{)}$$

$$S_c = 700 \text{ psi (50 kg/cm}^2 \text{)}$$

Tahmin edilen kalınlık 8 inç (20cm) tir.

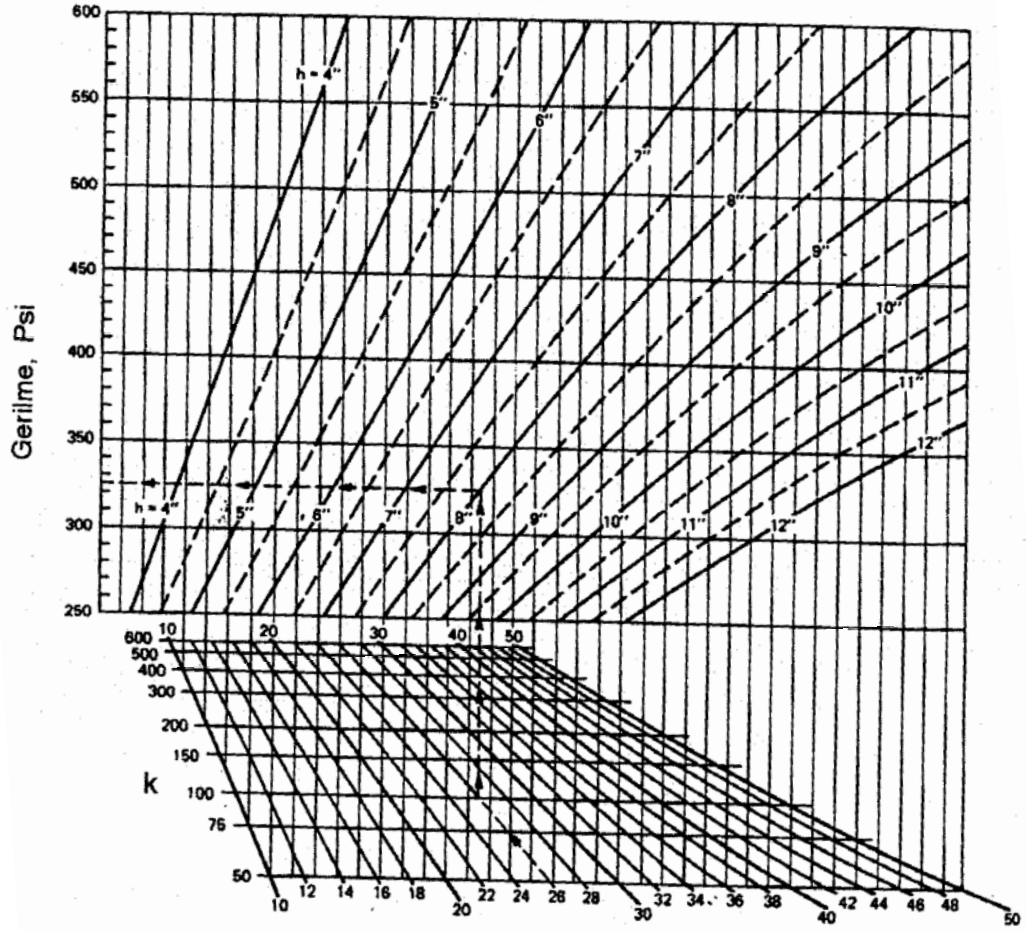
Dingil yükleri ve sayısı Tablo 3.3' de verildiği gibidir. Bu verilere göre plak kalınlığının yeterli olup olmadığı değerlendirilecektir.

Tablo 3.3' te 3. kolondaki gerilme Şekil 3.5 ve 3.6' dan ve izin verilen tekrarlı yük sayısı Tablo 3.2'den elde edilmiştir. Kullanılan yorulma direnci = 6. kolon (izin verilen tekrar) / 5. kolon (tahmin edilen tekrar) x 100 olarak hesaplanmıştır. Bu değer PCA' ya göre, % 125' ten fazla olmaması gerekmektedir.

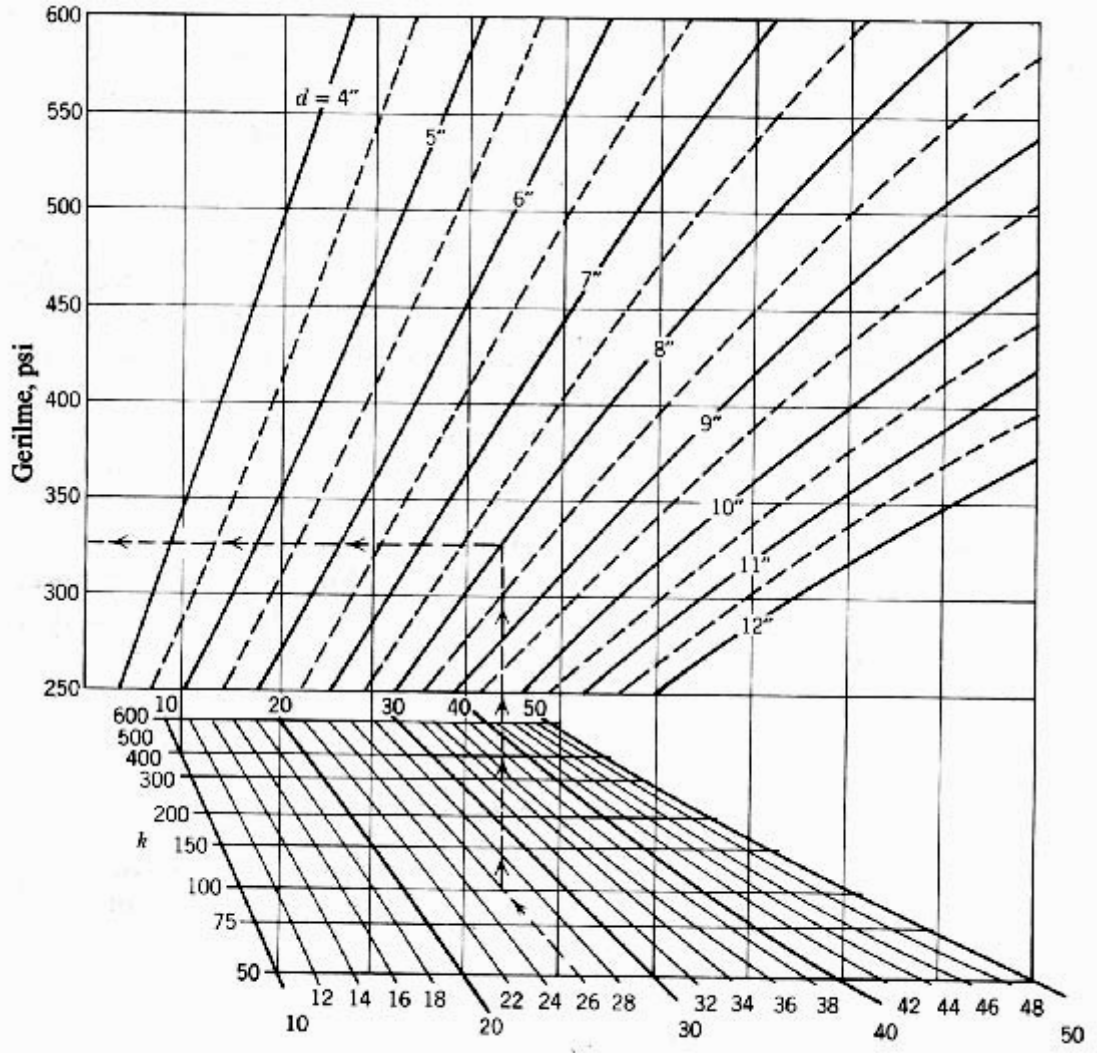
Bu durumda seçilen beton plak kalınlığı 8 inç (20 cm) olup, bu kalınlık trafik hacmi için yeterli olmaktadır.

Tablo 3.3: Trafik Artışının Yıllık Oranları ve Koruma Faktörleri ile Uyumu

1	2	3	4	5	6	7
Dingil Yükü (kips)	Dingil Yüküx1.2 (kips)	Gerilme (psi)	Gerilme oranı	Müsaade edilir tekerrür	Tahmin edilen tekerrür	Kullanılan yorulma direnci(%)
Tek Dingil Yükü						
30	36.0	440	0,63	14000	3500	25
28	33.6	400	0,57	75000	3500	5
26	31.2	370	0,53	240000	6000	3
24	28.8	360	0,51	400000	10000	3
22	26.4	325	<0,50		150000	0
Tandem Dingil Yükü						
54	64.8	475	0,68	3500	100	3
52	62.4	460	0,66	6000	500	8
50	60.0	450	0,64	11000	1000	9
48	57.6	440	0,63	14000	1500	11
46	55.2	410	0,59	42000	6000	14
44	52.8	400	0,57	75000	6000	8
42	50.4	375	0,54	180000	15000	8
40	48.0	370	0,53	240000	20000	8
TOPLAM					223100	%105



Şekil 3.5: Tek Dingil için Beton Üstyapıdaki Gerilmeler (PCA)



Şekil 3.6: Tandem Dingil için Beton Üstyapıdaki Gerilmeler (PCA)

3.2 Ampirik-Analitik Yöntemler

3.2.1 AASHTO 1993 Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemi

AASHTO yol deneyi sonucunda, beton plak kalınlığı ve hizmet yeteneği ilişkisine dayanan eşitlik (3.5) geliştirilmiştir [15].

$$\log_{10} W_{t8.2} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10}(d+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(d+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \cdot p_t) \log_{10} \left[\frac{S_c C_d (d^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[d^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c / k)^{0.25}} \right]} \right] \quad (3.5)$$

Burada;

$W_{t8.2}$: 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı,

Z_R : Standart sapma,

S_0 : Toplam standart sapma,

d : Beton plağın kalınlığı (inç),

ΔPSI : Başlangıçtaki tasarım hizmet yeteneği indeksi (p_0) ile son hizmet yeteneği indeksi (p_t) farkı,

S_c : Portland çimentolu betonun kopma modülü (psi),

J : Yük transfer (nakil) katsayısı,

C_d : Drenaj katsayısı

E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü (psi)

k : Taban reaksiyon modülü (pci) dür.

(3.5) ifadesinden Şekil 3.5'te verilen abak geliştirilmiştir. Bu parametrelerin belirlenmesi ile, Eşitlik 3.5 ile veya abak yardımı ile beton plak kalınlığı tespit edilmektedir.

Beton Elastisite Modülü (E_c)

Beton elastisite modülünün, ACI (Asfalt Concrete Institute) tarafından (3.6) ifadesi ile bulunması önerilmektedir [12].

$$E_c = 57000 \sqrt{\sigma_c} \quad (3.6)$$

Burada;

E_c : Beton elastisite modülü , (psi)

σ_c : Betonun serbest basınç mukavemeti (15x30 silindir ile) (psi) dir.

Betonun Kopma Modülü (Eğilmedeki Çekme Mukavemeti) (S_c')

Betonun kopma modülü, 28 günlük standart beton kırılganlara üç-nokta yüklemesi ile elde edilen ortalama değerdir. Kopma modülü, standart sapma ve mukavemet değerinin %' sinin normal dağılımı (3.7) ifadesi ile bulunmaktadır [12]. Bu ifade;

$$S_c' = S_c + z (SD_s) \quad (3.7)$$

şeklindedir.

Burada;

S_c' : Beton kopma modülünün tahmini ortalama değeri, psi

S_c : Beton kopma modülünün tasarım değeri, psi

SD_s : Beton kopma modülünün tahmini standart sapması, psi anlamına gelmektedir.

z: Standart normal dağılım

% 20 dağılım için z: 0,841

%15 dağılım için z: 1,037

%10 dağılım için z: 1,282

%5 dağılım için z: 1,645

%1 dağılım için z: 2,327

Burada tasarım mukavemetinden daha az mukavemete sahip numunelerin izin verilebilir yük tekrar sayısı göz önüne alınacaktır. Yani % 95 güvenilirlik için, $z=1,645$ olarak alınması gerekmektedir.

Yük Transfer Katsayısı (J)

Beton üstyapının, derzlerde veya çatlaklarda yükü transfer edebilme yeteneği için, yük transfer katsayısı (J) bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır.

Tablo 3.4: Tavsiye Edilen Yük Transferi Katsayıları

BANKET	ASFALT		BETON KAPLAMA	
	Var	Yok	Var	Yok
Yük Transferi	Var	Yok	Var	Yok
Üstyapı Tipi	J	J	J	J
Donatısız Derzli	3,2	3,8-4,4	2,5-3,1	3,6-4,2
Donatılı Derzli	3,2	3,8-4,4	2,5-3,1	3,6-4,2
Sürekli Donatılı Derzsiz	2,9-3,2	-	2,3-2,9	-

Drenaj Katsayısı (C_d)

Beton üstyapı tasarımında, drenaj katsayısı için tavsiye edilen değerler Tablo 3.5'de verilmiştir [12].

Tablo 3.5: Tavsiye Edilen Drenaj Katsayıları

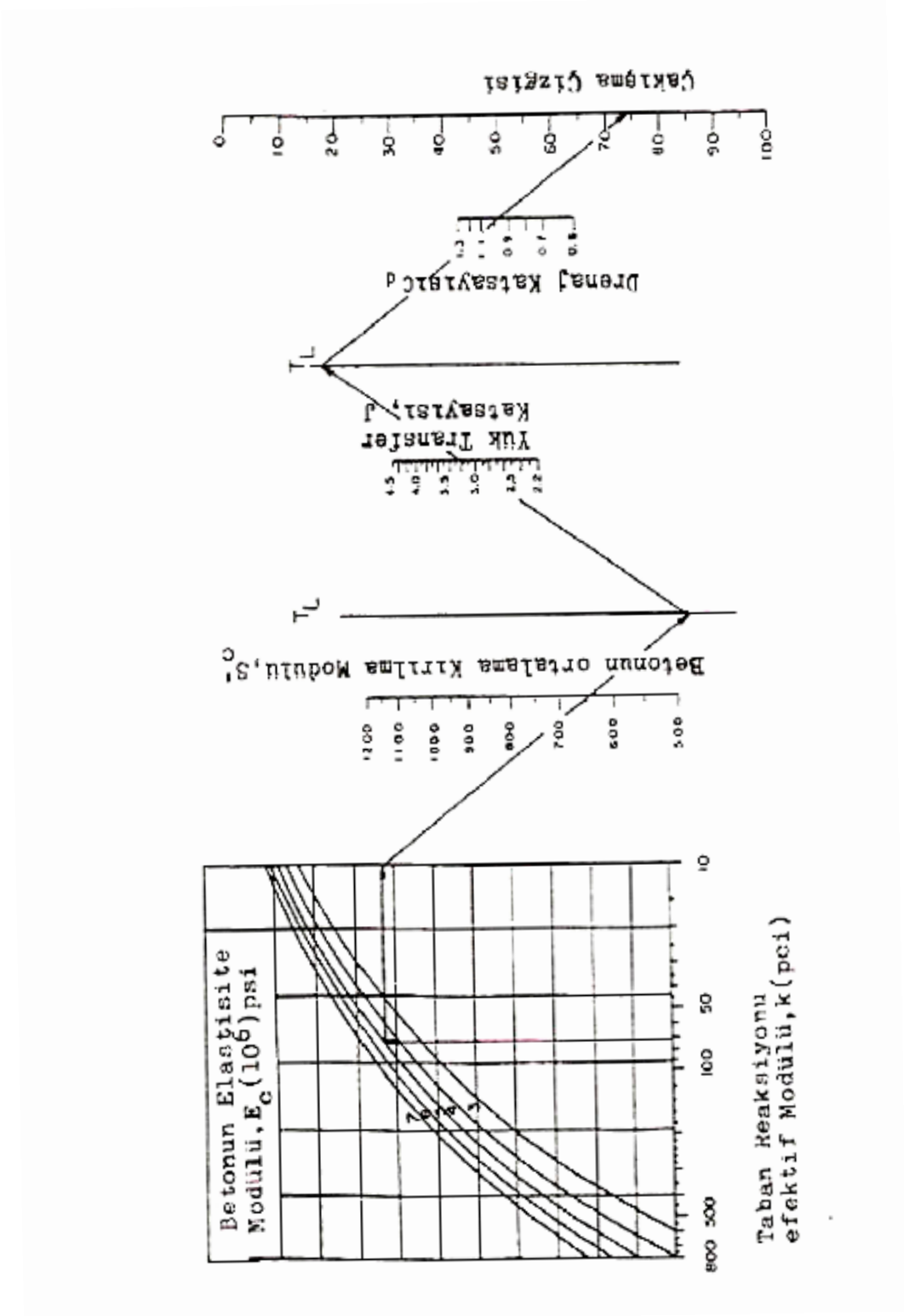
DRENAJ KALİTESİ	SUYUN UZAKLAŞTIRMA SÜRESİ	KAPLAMANIN DOYGUNLUK SEVİYESİNE YAKIN SU İÇERİĞİNE MARUZ KALDIĞI SÜRENİN YÜZDESİ			
		<%1	<%1-5	%5-25	>%25
Çok iyi	2 saat	1,25-1,20	1,20-1,15	1,15-1,10	1,10
İyi	1 gün	1,20-1,15	1,15-1,10	1,10-1,00	1,00
Vasat	1 hafta	1,15-1,10	1,10-1,00	1,00-0,90	0,90
Kötü	1 ay	1,10-1,00	1,00-0,90	0,90-0,80	0,80
Çok Kötü	Dren yok	1,00-0,90	0,90-0,80	0,80-0,70	0,70

Hizmet yeteneği Kaybı (Δ PSI)

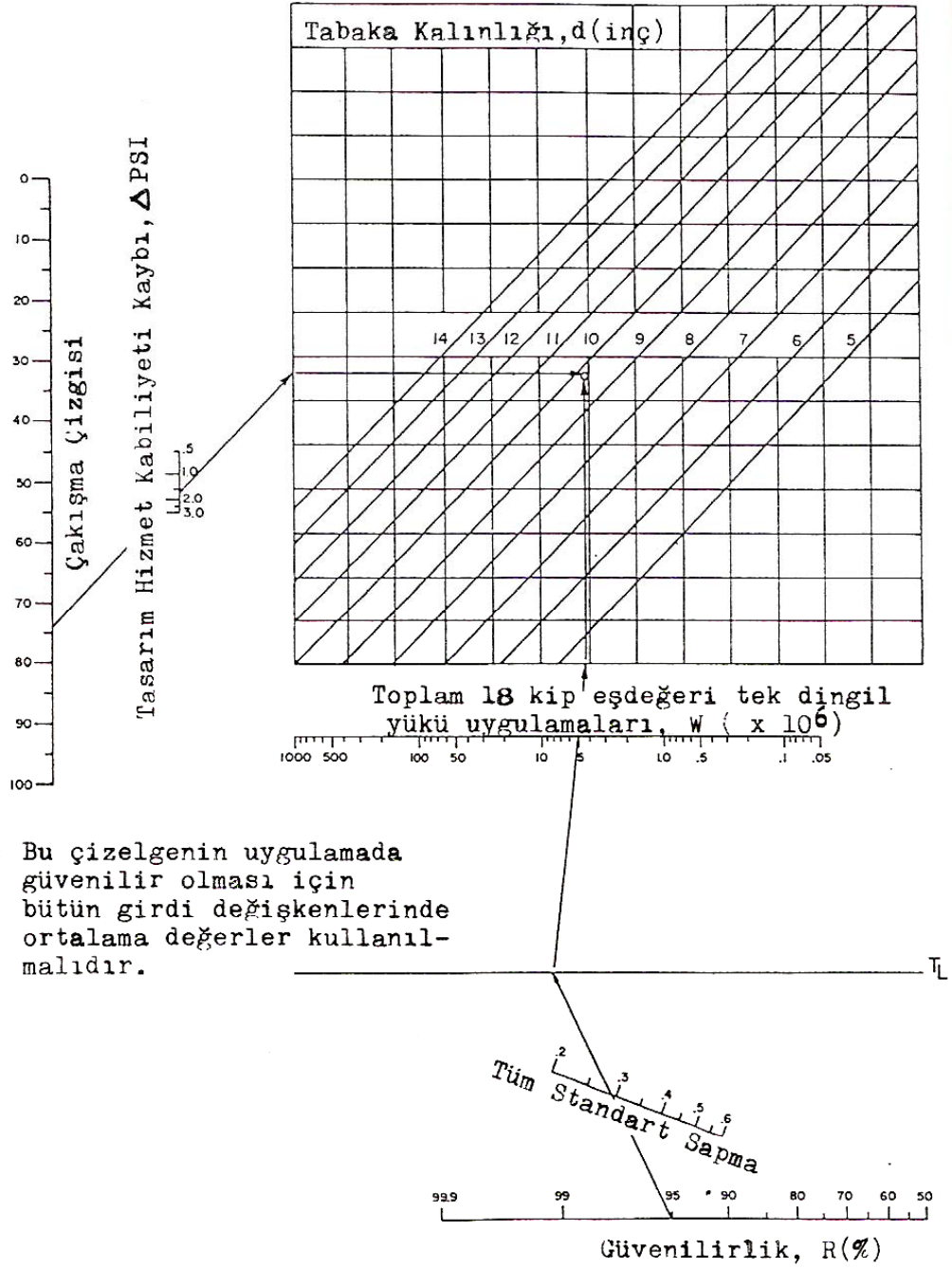
Hizmet yeteneği kaybı, Δ PSI= P_0-P_t şeklinde bulunmaktadır. P_0 , üstyapının başlangıç hizmet yeteneği indeksi ve P_t ise, performansını kaybettiği andaki hizmet yeteneği indeksidir. Rijit üstyapılarda $P_0=4,5$ ve yüksek trafik hacimli yollarda $P_t=2,5$ ve düşük hacimli yollarda $P_t= 2,0$ olarak alınması tavsiye edilmektedir.

Standart Sapma (S_0) ve Güvenilirlik (R)

Tablo 2.6' da güvenilirlik için tavsiye edilen değerler verilmiştir. Rijit üstyapılar için, $S_0 = 0,35$ olarak alınması önerilmektedir.



Şekil 3.7: Her Girdi Değişkeni için Ortalama Değerleri Kullanarak Hazırlanmış Rijit Üstyapı Tasarım Çizelgesi (I)



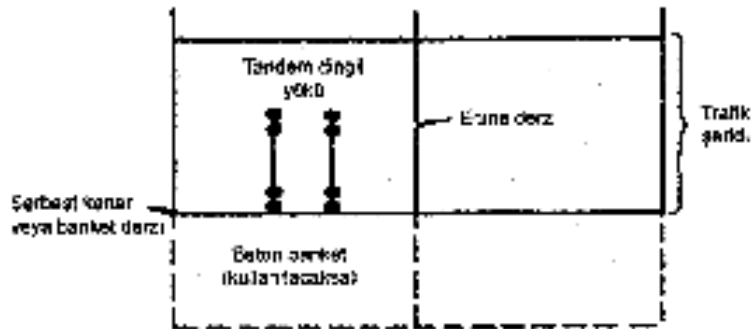
Şekil 3.8: Her Girdi Değişkeni için Ortalama Değerleri Kullanarak Hazırlanmış Rijit Üstyapı Tasarım Çizelgesi (II)

3.2.2 Portland Çimento Birliği Yöntemi (1984)

Yeni PCA yönteminde, yönteme yorulma ve erozyon analizleri ilave edilmiş olup, beton plağın orta kısımlarındaki kritik yüklemeler esas alınmıştır. Yorulma analizinde, kaplama betonunun yorulması ile parçalanması, erozyon analizinde ise, pompaj, zeminin erozyonu ve derz kusurları ile beton plağın bozulması dikkate alınmaktadır [12].

Bu yöntem, analitik-ampirik bir yöntemdir. Çünkü sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlanmış bir bilgisayar programı (JSLAB) ile kritik gerilmeler ve defleksiyonlar hesaplanarak tablolar ve abaklar hazırlanmıştır. Ayrıca kaplama kusurları ve performansı için AASHTO yol deneyleri esas alınmıştır [12].

Yorulma analizi, enine derzler arasında tandem dingil yükünün yarattığı plak kenar gerilmeleri esas alınarak yapılmaktadır. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, en kritik yükleme pozisyonu, enine derzlerden en uzak yerlerde yani, plağın orta kısımlarından serbest plak kenarına yapılan tandem dingil yüklemeleri olmaktadır. Bu durumda enine derzlerin varlığının kenar gerilmeleri üzerinde bir etkisi olmamaktadır. Eğer kaplama beton bankete bağlı ise, kritik gerilme şiddeti önemli ölçüde azalmaktadır [12].



Şekil 3.9: Yorulma Analizi için Kritik Yükleme Pozisyonu (PCA)

Yorulma analizinde toplam hasar kavramı esas alınmaktadır. Ayrıca tasarım, yönteminde sadece ortalama yatak katsayısı (k) esas alınırken, burulmalardan (yani

beton plağın aşağı veya yukarı doğru kıvrılması) ötürü oluşan gerilmeler dikkate alınmamaktadır. Toplam hasar ise, aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_j} \leq 1.00 \quad (3.8)$$

Bu ifadede,

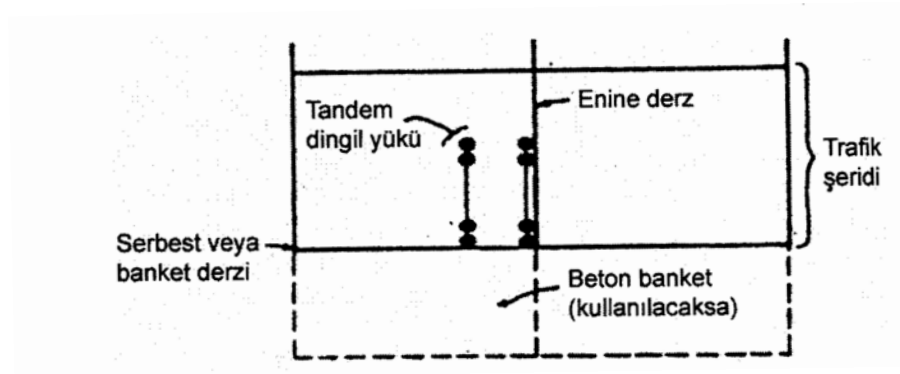
D: Toplam hasar,

m : Dingil yük gruplarının toplam sayısı,

n_j : i. yük grubunun tekrar sayısı,

N_j : i. yük grubunun müsaade edilir tekerrür sayısıdır.

Şekil 3.9' da görüldüğü gibi, aracın dış tekerleği plak kenarında iken yarattığı kritik gerilme, plağın diğer noktalarındaki gerilmelerden daha fazla olmaktadır. Eğer dingil yükü plak kenarından birkaç santim ortaya doğru ilerleyecek olursa, gerilme önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, plak kenarındaki yük tekrar sayısı, yorulma analizi için gerekli olup, bu durum yorulma analizinin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Ancak, Şekil 3.10' da görüldüğü gibi, plak kenarına etkiyen kamyon yükünün %6'dan daha fazla olması halinde, yorulma için plak kenar gerilme oranı sabit olup, %6'lık kamyon oranı için, düzeltme faktörü 0,894 alınarak tasarım için gerekli tablolar hazırlanmıştır [12].



Şekil 3.10: Erozyon Analizi için Kritik Yükleme (PCA)

1984 PCA yöntemine getirilen erozyon analizi ile kaplamamın bozulmaları dikkate alınmaktadır. Erozyon analizinde, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, köşe yüklemesi esas alınmaktadır. AASHTO yol deneylerinden elde edilen pompaj ve granüler alt temel erozyonundan kaynaklanan üstyapı bozulmaları göz önüne alınarak, izin verilen yük tekrarı, aşağıdaki gibi bulunmaktadır [12].

$$\log N = 14,524 - 6,777 (C_1 P - 9,0)^{0,103} \quad (3.9)$$

Burada;

N : İzin verilen yük tekrar sayısı (PSI = 3,0 esas alınarak),

C₁ : Düzeltme faktörü (stabilize edilmemiş alt temel için 1,0 ve stabilize edilmiş alt temel için 0,9)

anlamına gelmektedir.

P ise, aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

$$P = 268,7 \frac{q^2}{hk^{0,73}} \quad (3.10)$$

Burada;

q : Beton plak köşesinin altındaki temelde oluşan basınç, psi

h : Beton plak kalınlığı, inç

k : Yatak katsayısı, pci (lb/inç³) dir.

Erozyon hasarı aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

$$\text{Erozyon hasar yüzdesi} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i} \leq \%100 \quad (3.11)$$

Burada C₂, düzeltme faktörü olup, granüler banketli üstyapılar için 0.06, beton plağa bağlanmış veya bağlanmamış beton banketli üstyapılar için ise 0.94 alınmaktadır [12].

1984 PCA yöntemi ile karayolu üstyapı tasarımı aşağıdaki adımları içermektedir [12];

1-Her bir tasarım dingil yükü grubunun yükü, uygun emniyet faktörü (1,2,1,1 veya 1,0) ile

çarpılarak bulunur.

2-Tahmini plak kalınlığı seçilir.

3-Seçilen plak kalınlığı ve yatak katsayısı dikkate alınarak, Tablo 3.6 veya 3.7' dan eşdeğer gerilmeleri belirlenir ve gerilme oranı faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır.

Gerilme Oranı Faktörü = Eşdeğer Gerilme/ Beton Eğilme Mukavemeti

4-Her bir i. yük grubu için, Şekil 3.11' den yorulma analizinde izin verilen yük tekrar sayısı (N_j) tespit edilir.

5-Toplam hasar, [3.7] eşitliği ile hesaplanır. Eğer $D > 1$ ise, daha büyük plak kalınlığını seçerek 3. adımdan 5. adıma kadar olan işlemler tekrarlanır. Eğer $D < 1$ ise, seçilen plak kalınlığının uygun olacağına karar verilir.

Beton üstyapı tasarımında her ne kadar zemin yatak katsayısı esas alınsa da, alt temel tabakasının kalınlığı ve cinsine bağlı olarak, Tablo 3.8' den alınan arttırılmış yatak katsayısı kullanılmalıdır. Beton plak alt temel üzerine yapılacağı için, tasarımda alt temel üzerindeki yatak katsayısı (k) göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, zeminin su içeriğinin değişmesiyle k değeri bir miktar azalsa da veya zeminin donmasıyla k değeri bir miktar artsa da, bu durumların beton üstyapı kalınlığı üzerindeki etkisi çok az olmaktadır [12].

Tablo 3.6: Beton Banketsiz Üstyapılarda Beton Plağın Eşdeğer Gerilmesi (PCA)

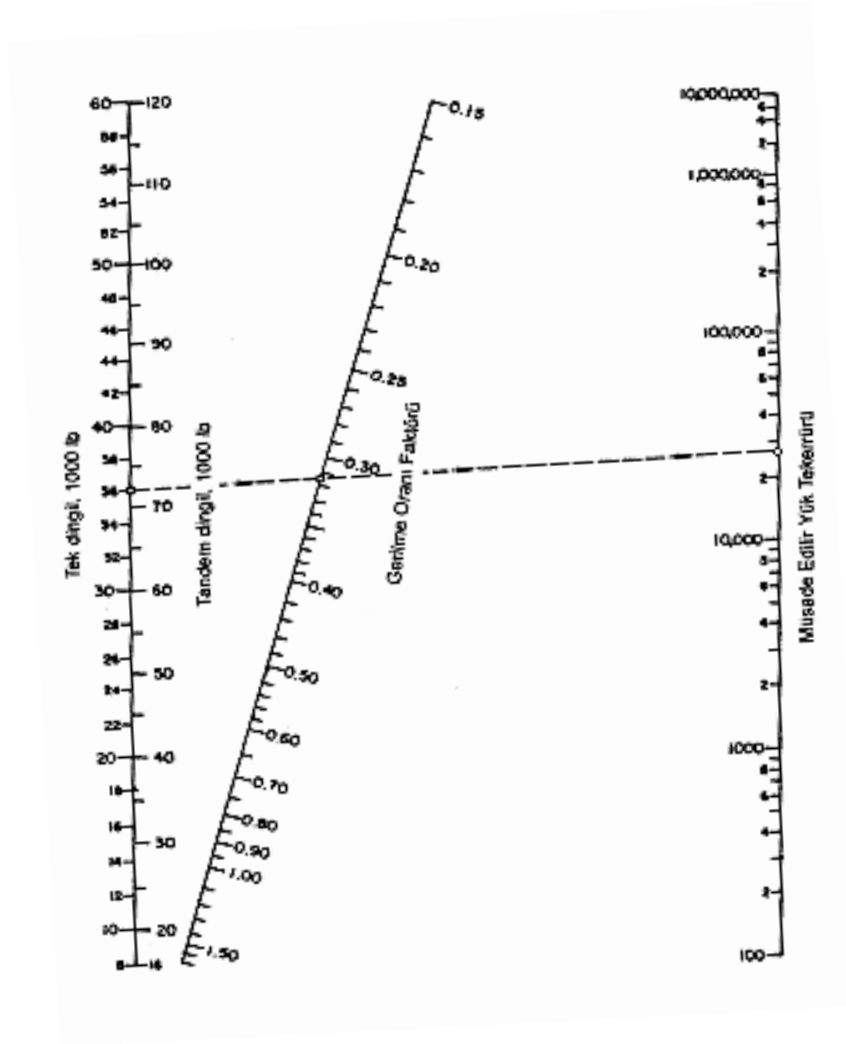
Plak kalınlığı inç	k, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için

Tablo 3.7: Beton Banketli Üstyapılarda Beton Plağın Eşdeğer Gerilmesi (PCA)

Plak kalınlığı inç	k, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/170	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/93	93/87	87/79	81/71	77/67

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için



Şekil 3.11: Yorulma Analizi için İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı (PCA)

Tablo 3.8: Alt temel Tabakası Üzerindeki k Değeri (PCA)

ZEMİN K DEĞERİ (PCI)	GRANÜLER ALT TEMEL				ÇİMENTO STABİLİZE ALT TEMEL			
	Alt temel k değeri (pci)				Alt temel k değeri (pci)			
	4''	6''	9''	12''	4''	6''	9''	12''
50	65	75	85	110	170	230	310	390
100	130	140	160	190	280	400	520	640
200	220	230	270	320	470	640	830	-
300	320	330	370	430	-	-	-	-

Tablo 3.6 ve 3.7' de, beton banketsiz ve beton banketli üstyapı için, beton plağın eşdeğer gerilmeleri verilmiştir. Bunun için beton plak kalınlığı ile zeminin yatak katsayısı esas alınarak, tekerlek yükünün üstyapıda yarattığı gerilmenin standart yüke nazaran eşdeğer gerilmesi tablolardan tespit edilmektedir. Bunlardan ilki, tek dingil, ikincisi tandem dingil için verilmiştir. Ara değerler ise, enterpolasyonla elde edilebilmektedir [12].

Tablo 3.6 ve 3.7' den ve Şekil 3.11 ile yapılan yorulma analizinden sonra, ilave olarak erozyon analizinin de yapılması gerekmektedir. Erozyon analizi esasen temel ve banket erozyonu için üstyapı kalınlığını kontrol etmek amacıyla yapılmaktadır. Zira en kritik defleksiyonlar köşe kısımlarda olmakta ve banketin varlığı ile derz tipi erozyon analizini etkilemektedir. Erozyon analizi aşağıdaki adımları kapsamaktadır [12].

1-Her bir tasarım dingil yükü grubunun yükü, uygun emniyet faktörü ile çarpılarak bulunur.

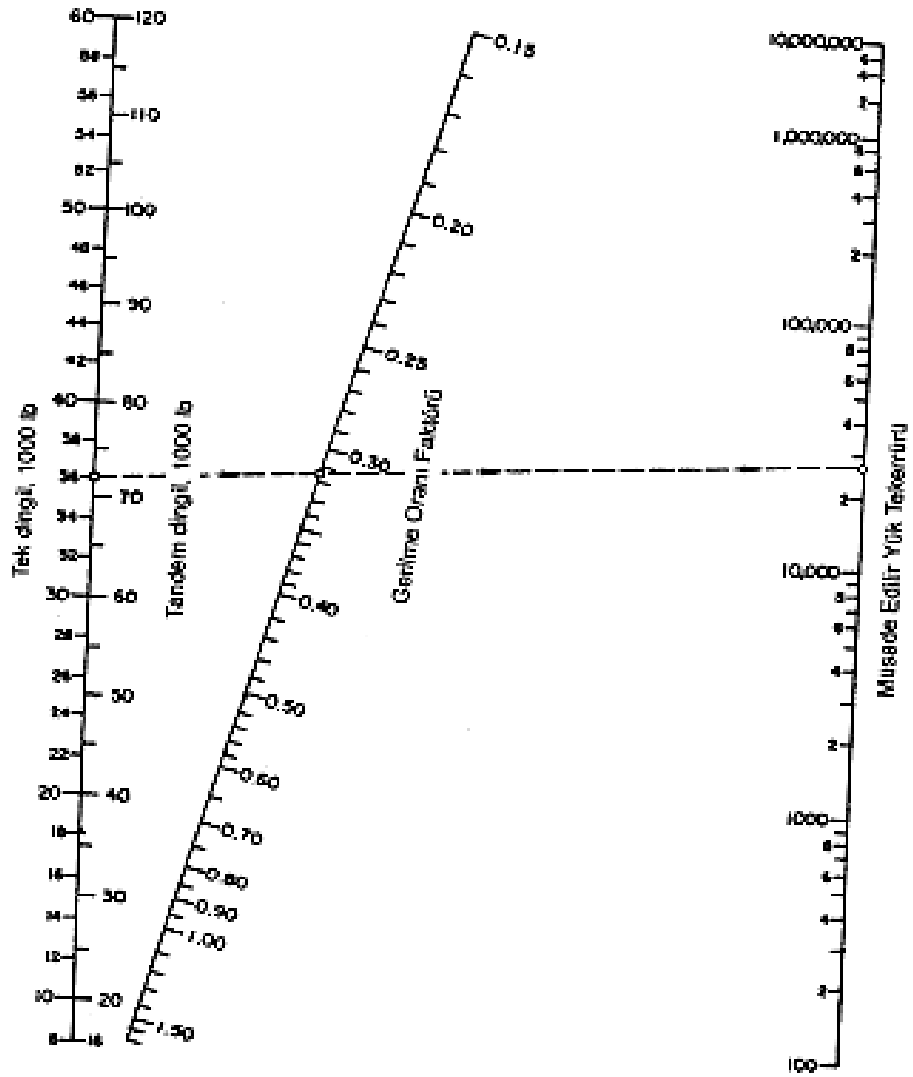
2-Tahmini beton plak kalınlığı seçilir.

3-Seçilen plak kalınlığı ve yatak sayısına göre Ek-3'te verilen tablolardan erozyon faktörü bulunur.

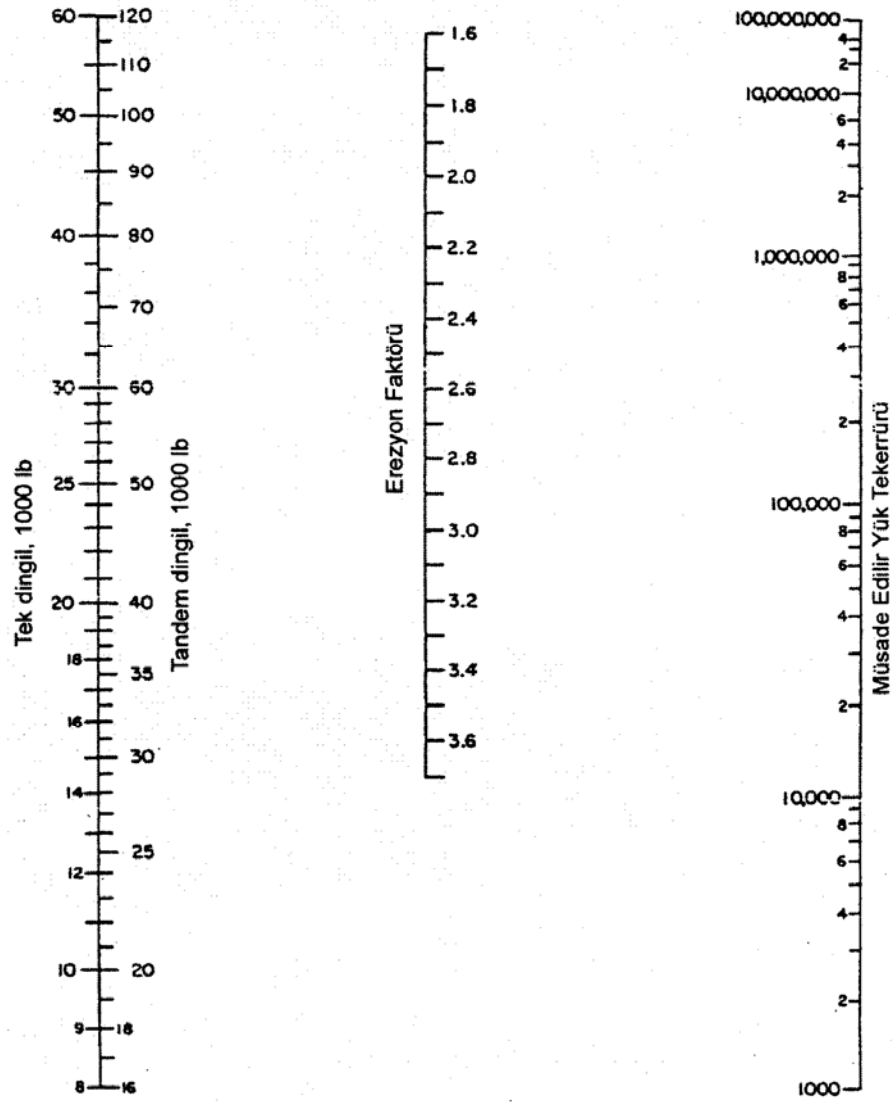
4-Her bir i. yük grubu için Şekil 3.12 ve 3.13' den müsaade edilir yük tekrar sayısı (N_j) saptanır.

5-Toplam hasar hesaplanır. Eğer $D > 1$ ise daha kalın plak kalınlığı seçilerek 3. adımdan 5. adıma kadar olan işlem tekrarlanır. Eğer $D < 1$ ise, seçilen plak kalınlığının uygun olduğuna karar verilir.

Erozyon analizi için gerekli erozyon faktörü, beton plakların derzlerinde donatı kullanılması veya kullanılmamasına ve banketin beton kaplamalı olması veya olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Çünkü temel ve banketin erozyon miktarı, derzlerde donatı kullanılması ve banketin beton kaplamalı olmasına bağlı olarak, AASHTO yol deneylerindeki gözlemler ile elde edilmiş sonuçlardır. Ayrıca, erozyon faktörü plak kalınlığı ile yatak katsayısına bağlı olarak da değişmektedir [12].



Şekil 3.12: Erozyon Analizi için İzin Verilen Tekrarlı Yük Sayısı - Beton Kaplamasız Banketli Üstyapı (PCA)



Şekil 3.13: Erozyon Analizi için İzin Verilen Tekrarlı Yük Sayısı- Beton Kaplamalı Banketli Üstyapı (PCA)

4. HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIMI

Bir havaalanı üstyapısı, uçaklar tarafından yüklenen aşırı deformasyon ya da bozulmaya neden olmayacak ölçekteki yükü taşıyabilmektedir. Üstyapı, uygulanan yüklerin etkilerine karşı koymalı, çevreye bağlı deformasyona ve trafiğin aşındırıcı etkilerine dirençli olmalı, düzgün ve kaymaya dirençli bir yüzey sağlamalıdır. Üstyapı tüm mevsimlerde ve tüm hava koşullarında kullanılabilir olmalıdır. Belirli bir uçak trafiği için bu işlevleri yerine getirmesi beklenen üstyapı, temel veya taban zeminine, inşaat malzemesinin ve iş gücünün kalitesine, üstyapı karışımındaki malzeme içeriğine ve üstyapı tabakalarının kalınlığına dayanmaktadır [17] . Bu bölüm, üstyapının yapısal tasarımına dayalı olup, üstyapı tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesini içermektedir.

Havaalanı ve karayolu üstyapılarının tasarımında genel prensip benzerdir. Bunun yanında, havaalanı ve karayolu üstyapı tasarım yöntemleri arasında, tasarım parametreleri açısından belirgin farklar bulunmaktadır. Bu farklar, tasarım ömrü boyunca uygulanan yükün büyüklüğü, lastik basıncı, üstyapıya tasarım sürecinde uygulanan yük tekrar sayısı ve malzeme içeriği olarak sayılabilmektedir [5].

Jet uçakları için, yükün türü de üstyapı tasarımını etkileyen başka bir faktördür. Jet uçaklarının bir çoğu yüksek basınca sahip lastiklerle donanmıştır. Bu basınç, lastiklerin “delme” etkisine karşı koyabilmek için yüksek kalitede üstyapıyı zorunlu kılmaktadır [5].

Tarihsel olarak tüm havaalanı üstyapı tasarımları, uçak pisti ve birincil taksiyolu (gerekli durumlarda kullanılacak yardımcı pist) gibi en kritik alanlar üzerine kurulmuştur. Jet uçaklarının tanıtımı ve hızlanmaya, yavaşlamaya, rotasyon noktasındaki yüke bağlı daha büyük dinamik gereksinimleri, kritik havaalanı zemininin incelenmesi için (statik durumun aksine), tasarım prensiplerinin yeniden gözden geçirilmesiyle sonuçlanmıştır. Dinamik uçak etkisi, tasarım bakış açısından

değerlendirildiğinde, statik ya da yavaş hareket eden koşullardan daha etkili olduğu görülmüştür [5].

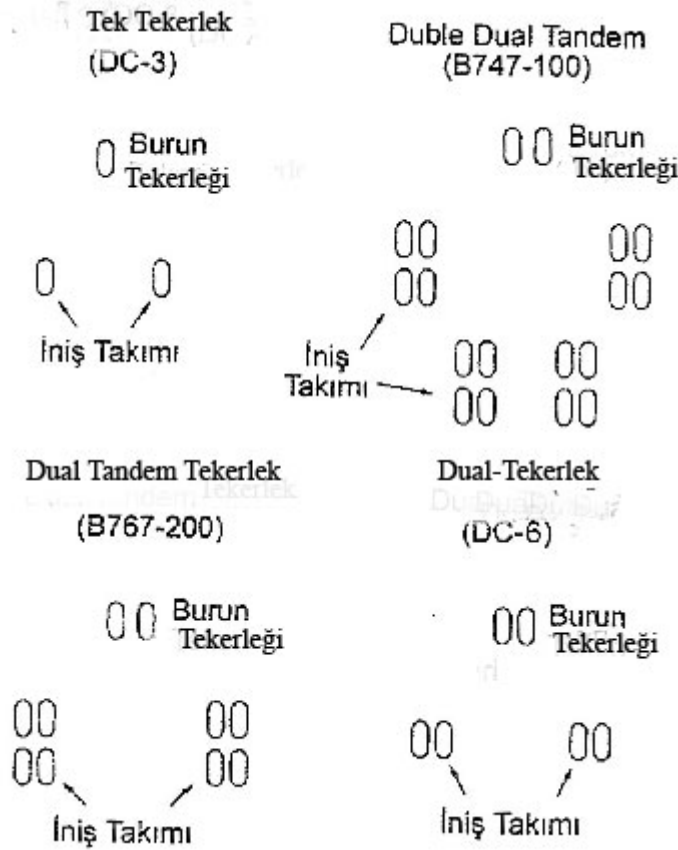
Tüm esnek üstyapı tasarımcıları tarafından, yapısal ve fonksiyonel eksiklik arasındaki farkları tanımlama ve belirleme adına ortak çaba geliştirilmiştir. Analizlerin yapısal çeşitleri üzerine kurulu tasarım yöntemleri; yerini, pürüzlülük (ya da kullanılabilirlik) üzerine dayanan tasarım yöntemine bırakmıştır. Bunun yanısıra, havaalanı üstyapı tasarımına ilişkin en etkili kuruluş Amerikan Mühendisler Kurulu'dur. Bu kuruluşun, havaalanı üstyapı çalışmalarına ait araştırmaları tüm dünyaca kabul görmüştür. Ayrıca, askeri havaalanı tasarım üreticilerine bağlı temel kavramların bir çoğu, genellikle sivil havaalanı analizleri için kullanılmaktadır [5].

Havaalanı üstyapılarının taşıma kapasitelerinin tespiti için iki yöntem önerilmiştir. 1956 yılında Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO) tarafından LCN sistemi önerilmiş ve bunun 1965 yılında ikinci baskısı yapılmıştır. Bu yöntem zamanla geliştirilmiş ve ICAO tarafından 1977 yılında LCG (yük sınıflandırma grubu) sistemi yayınlanmıştır[16]. Daha sonra 1981 yılında, ICAO Ek-14'te uçağın yük oranları ve havaalanı üstyapı kuvvet dayanımının rapor edilmesinde kullanılacak olan uluslararası nitelikli standart ACN/PCN sistemi yayınlanmıştır [17]. Bu yöntem, üstyapı tasarımı için planlanmadığından, burada, tasarım yöntemlerinden sonra kısaca anlatılmıştır.

Havaalanları esnek üstyapılarının tasarımı için, FAA, ABD Mühendisler Kurulu, Asfalt Enstitüsü, Fransa ve Kanada Pratiği gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. Havaalanı esnek üstyapı tasarım yöntemleri bu bölümde ampirik ve analitik olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Ampirik yöntemlere örnek olarak, Mühendisler Kurulu-CBR yöntemi, Federal Havacılık İdaresi Yöntemi (FAA) ve analitik yöntemlere örnek olarak da Asfalt Enstitüsü Yöntemi verilmiştir.

4.1 Uçakların Tasarım ile İlgili Özellikleri

Uçakların, havaalanlarının geometrik tasarımı ve üstyapı tasarımını etkileyen özellikleri burada verilmiştir [16]. Uçak kütlesi; Pist, taksiyolu ve apronun projelendirilmesinde kullanılır. Üstyapı tasarımında uçakların maksimum kalkış kütlesi göz önüne alınmaktadır. Uçağın brüt ağırlığının % 95' inin ana tekerleklerde ve % 5'inin burun tekerleklerinde olduğu kabul edilmektedir [12]. Maksimum kalkış kütlesi, lastiklerin yerden ayrıldığı anda oluşan kütledir ve buna yer manevraları için kullanılan yakıt dahil değildir. (uçak boş kütlesi + uçuş yakıtı+ maksimum yük) [18].



Şekil 4.1: İniş Takımı Tekerlek Düzeni

Uçak kütlelerinin bileşenleri; ön tekerlek yüzdesi, arka tekerlek yüzdesi, tekerlek düzeni (iniş takımı düzeni), lastik basıncı, lastik değme yüzeyi şeklinde tanımlanan bu özellikler, tasarım yöntemini etkilemektedir. Şekil 4.1’ de uçakların tekerlek düzenleri ile ilgili bilgi verilmiştir. İniş takımı düzeni, uçak ağırlığının piste nasıl intikal ettiği ve üstyapının uçak yüküne nasıl tepki verdiğini belirlemektedir. Üstyapı kalınlıkları, iniş takımı boyut düzenine bağlı olduğu için uçakların iniş takımları ile ilgili şu kabuller yapılmıştır. Tek tekerlek düzenine sahip uçaklar için herhangi bir kabul yapılması gerekli değildir. Çift tekerlek düzenine sahip olan uçaklar için, tekerlek arasındaki boşluk, hafif uçaklar için 20 inç. (51 cm), ağır uçaklar için 34 inç (86 cm.) olarak kabul edilmektedir. Çift tandeme sahip uçaklar için, hafif uçaklarda tekerlekler arası mesafe 20 inç. (51 cm), tandemler arası 45 inç. (86 cm.), ağır uçaklar için tekerlekler arası mesafe 30 inç (76 cm.), tandemler arası ise 55 inç. (1,401 m.) olarak kabul edilmektedir. Geniş gövdeli uçaklar ise, çift tandem uçaklar gibi kabul edilebilmekte ya da bu uçaklara ait özel eğriler kullanılmaktadır [12].

Lastik iç basıncı değeri, tekerlek düzeni ve uçak kütlelerine göre 75 ve 200 psi (0,52 ile 1,38 Mpa) arasında değişmektedir [12].

Uçağın kanat açıklığı ve gövde boyutları; hangar ve apron projelendirmesinde, pist ve taksiyolu genişliğinde etkili olmaktadır. Ayrıca uçakların yolcu ve yük kapasitesi terminal binaları ile ilgili birimlerin boyutlandırılmasında kullanılmaktadır [18].

4.2 Ampirik Yöntemler

Bu bölüm kapsamında ampirik yöntemlerden Mühendisler Kurulu tarafından geliştirilen yöntem ile FAA yöntemi örnek tasarımları ile birlikte açıklanmıştır.

4.2.1 Mühendisler Kurulu Yöntemi (CBR)

II. Dünya savaşı başlarında, Mühendisler Kurulu, esnek üstyapı tasarımına ilişkin değişik yöntemleri içeren kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu araştırma sonucu CBR yöntemi kabul edilmiş ve üstyapıyı oluşturan farklı malzemelerin kalınlıkları CBR değerleri ile belirlenmiştir. Bu yöntemin bazı üstünlük ve

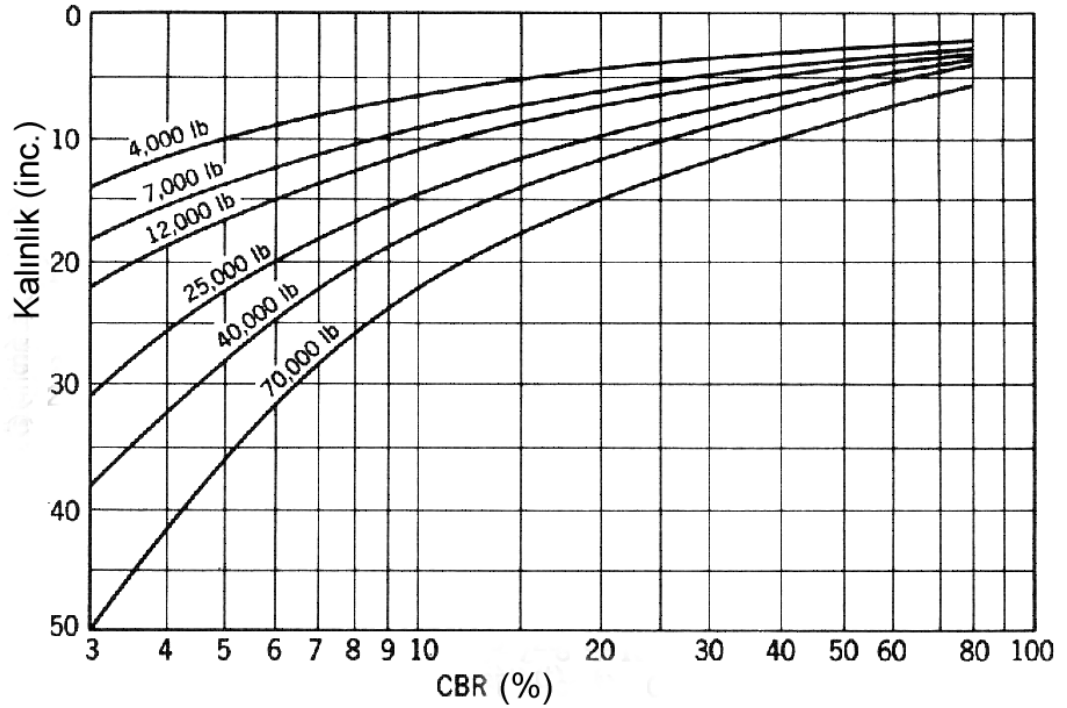
sakıncaları vardır. Yöntemin üstünlüklerinden biri, tasarım yönteminin gerçekleştirilmesi açısından basitliğidir, fakat yöntemin bir sakıncası, ampirik olması ve bu yüzden tasarımın korelasyonlara dayanmasıdır [5].

CBR tasarım yöntemi ilk olarak 1928 ile 1929 yılları arasında yapılan araştırmalar sonucu, Kaliforniya Karayolları idaresi tarafından kullanılmıştır [21]. Araştırmalar sonucunda; başlıca üstyapı bozulmaları: (1) üstyapının suyu emmesi sonucu zemin malzemesinin yanıl yer değışimi, (2) üstyapının altındaki malzemelerin farklılık gösteren oturmaları ve (3) üstyapı altındaki malzemenin aşırı defleksiyonu olarak belirlenmiştir.

Çoklu donanımlar için, tek tekerlekli yük eğrilerinden elde edilen temel tasarım eğrileri ve eşdeğer standart dingil yükünü (ESDY) tanımlamaya yönelik önceki yöntemler, eşdeğer taban zemini gerilmesi değerlerini kullanmıştır [5].

Mühendisler Kurulu 1950' lerde havaalanı üstyapılarına ilişkin kapsamlı tam-ölçekli bir deney gerçekleştirmiştir. Bu deneylerin sonuçlarının analizi ve üstyapının performansına ilişkin çalışmaları, iki parametreyle ifade edilebilmektedir. Bunlar, kalınlık/temas alanı^{1/2} ve CBR/lastik basıncıdır [17].

Şekil 4.2' de Mühendisler Kurulu tarafından ilk olarak geliştirilen tasarım grafiği verilmiştir.



Şekil 4.2: Orijinal Havaalanı Tasarım Eğrileri.

1956'da ki çalışmalar, üstyapının kalınlığının tekerlek yüküne ve lastik basıncına etkisi arasındaki ilişkiyi incelemiştir ve bu Eşitlik 4.1' de belirtilmiştir [5].

$$t = \sqrt{P \left[\frac{1}{8,1CBR} - \frac{1}{p\pi} \right]} \quad (4.1)$$

İleri araştırma çalışmaları, yük tekrarlarını kalınlık hesabına dahil etmiştir. Bu ilişki (4.2) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$t = \frac{(2,31 \log C + 14,4)}{100} \sqrt{P \left[\frac{1}{8,1CBR} - \frac{1}{p\pi} \right]} \quad (4.2)$$

(23,1 log C + 14,1) ifadesi tasarım süreci için değerlendirilen gerilme miktarının yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Eşitlik 4.1 ve 4.2' nin her ikisi de, 10 ile 12' den küçük CBR değerleri için uygulanabilmektedir. Ağır tekerlek yükleri ile ilgili ileri araştırmalar, tasarım eşitliğinde başka bir değişikliğe neden olmaktadır [22].

$$t = \alpha_i \left\{ \sqrt{A} \left[0,0481 - 1,1562 \left(\log \frac{CBR}{p_e} \right) - 0,6414 \left(\log \frac{CBR}{p_e} \right)^2 - \right] \right. \\ \left. 0,4730 \left(\log \frac{CBR}{p_e} \right)^3 \right\} \quad (4.3)$$

t'nin inç olarak esnek üstyapı kalınlığını ifade ettiği durumda;

α_i = yük tekrarı faktörünü,

A = inç² olarak tek lastiğin temas ettiği alanı,

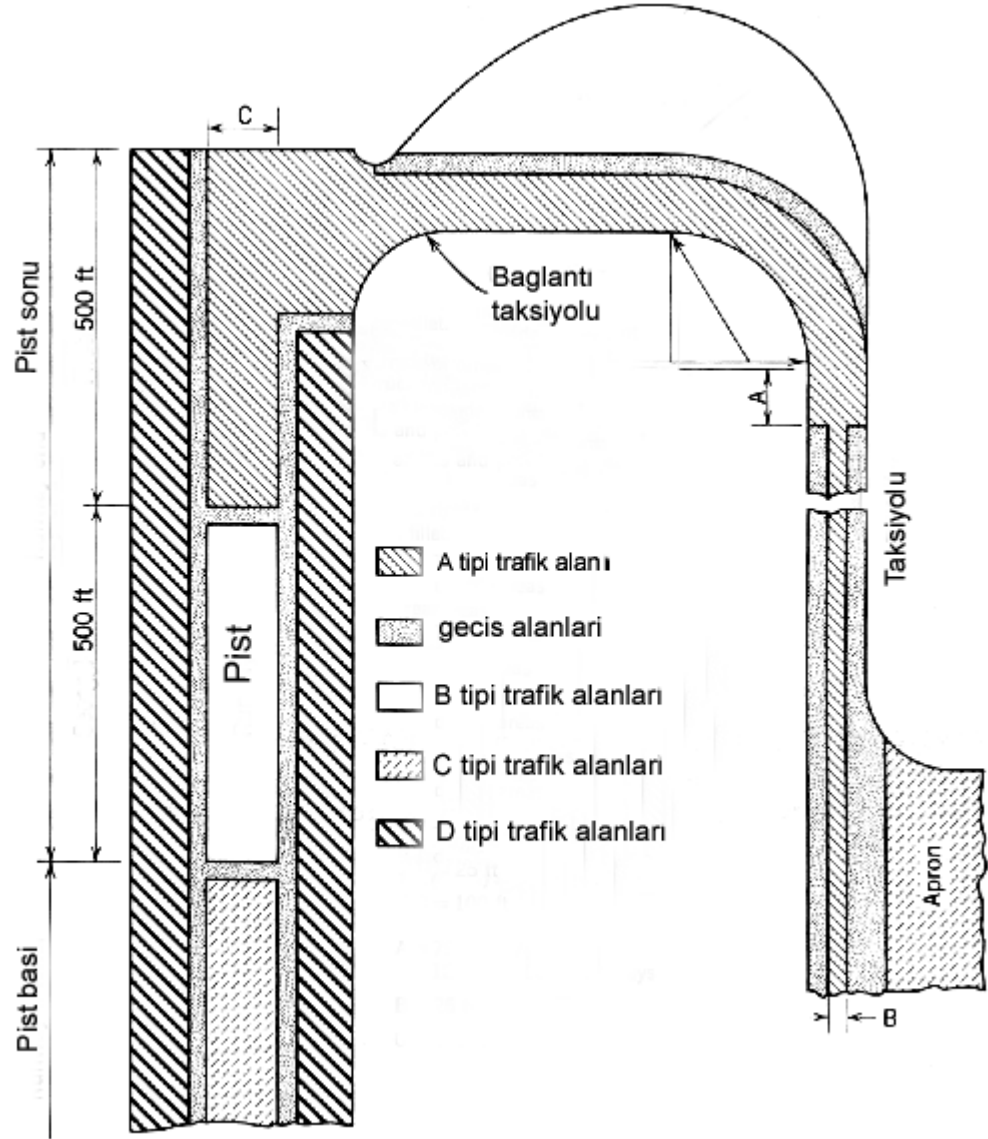
CBR = değerlendirilen tabakanın dayanım gücünü,

p_e = ESDY' yi hesaplarken t derinliğindeki lastik basıncını ifade etmektedir.

Yukarıdaki eşitlikte, lastik basıncı p_e , ESDY/A' ya eşittir. Böylece, bu parametre varsayımına dayanan bir basınç olup, $p_e = p_t$ şeklindedir. Bu basıncın, tek tekerlek yükü hariç, mevcut lastik basıncıyla herhangi bir ilişkisi yoktur. Eşitlik 4.3' teki başka bir önemli değişiklik de, α_i değerinin tanımlama şeklidir. Bu parametre, trafik yoğunluklarını hesaplayan bir kalınlık yüzdesi değeridir. α_i değeri, beklenen uçak kalkış miktarının fonksiyonu olduğu kadar, ESDY' nin hesaplanmasında kullanılan tekerlek düzeni ile de ilgilidir. Buna karşın; tasarım, doğrudan doğruya, tasarlanan uçağın toplam hareketi ile yapılmıştır. Yeni eşitlik tüm CBR değerleri için uygulanabilir niteliktedir.

Tasarım Eğrileri

Mühendisler Kurulu tarafından yayınlanan 1958 tasarım kılavuzları; [23], [24] çeşitli tekerlek yükleri, lastik basınçları, tekerlek düzeni ve trafik alanları üzerine dayanan tasarım eğrilerini içermektedir. Şekil 4.3' de trafik alanları verilmiştir. Şekilde, A tipi trafik alanları, pist sonu, bağlantı taksidyolları gibi kritik alanları, B tipi trafik alanı, pist orta bölümü ve taksidyollarını, C tipi trafik alanı pist başı ve apronları ve D tipi trafik alanı havaalanının diğer alanlarını tanımlamaktadır. Bu tasarımlar, Eşitlik 4.1 ya da 4.2 ile uyum içinde geliştirilmişlerdir. Daha sonra havaalanları üç yük tipinden birine göre sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.3: Trafik Alanları

Bu sınıflar; hafif yük, orta yük ve ağır yük taşıyan havaalanlarıdır. Her kategori, tasarım kalınlıklarını sağlayan, bir takım kritik havaalanı yük ve yapılandırma parametrelerine sahiptir. Şekil 4.4'den Şekil 4.6'ya kadar temel tasarım eğrileri gösterilmiştir. Her kategori için tasarım dingil yükleri, hafif, orta ve ağır yük havaalanları için sırasıyla 25, 100 ve 265 kip (11340 kgf, 45360 kgf ve 120200 kgf) tir.

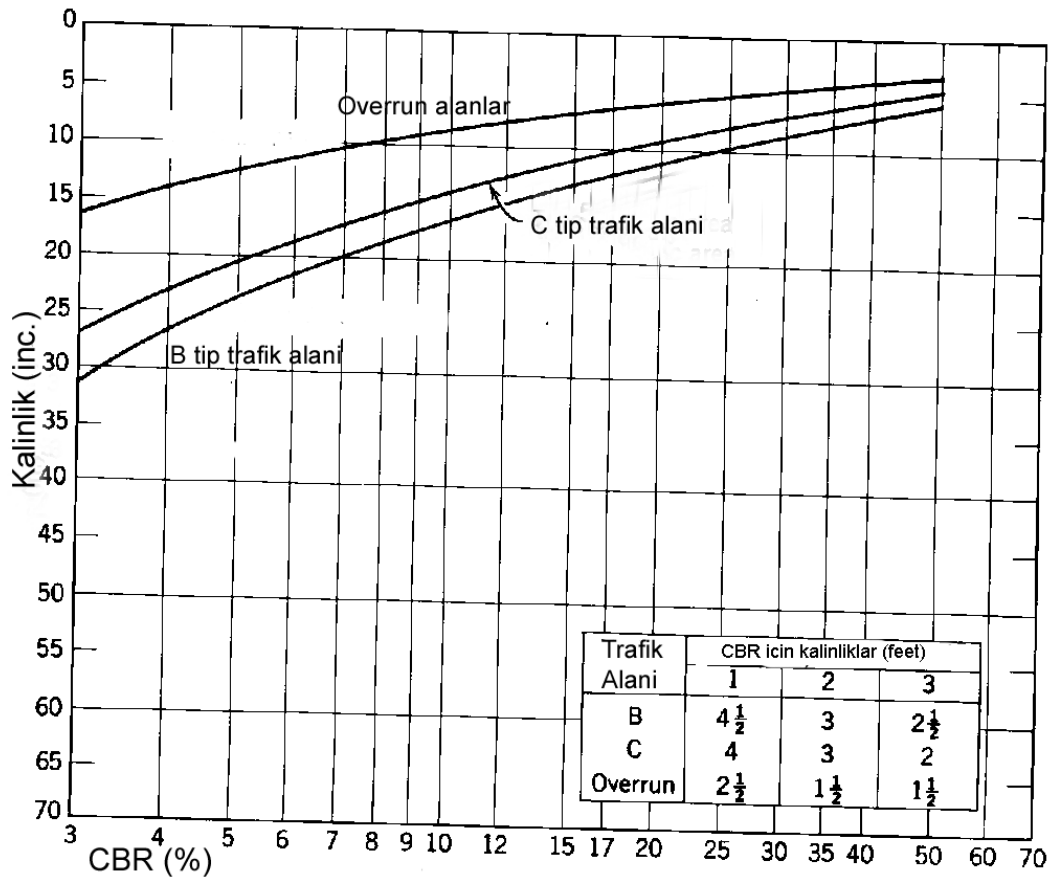
Bu eğriler, verilen bir CBR değeri için gerekli üst yapı kalınlığını vermektedir. Kalınlık tasarım eğrilerinde maksimum CBR değeri %50'dir. %50'den fazla CBR

değerleri için, kaplama ve temel tabakasının kalınlıkları gereken minimum kalınlığa kadar düşürülmelidir. Aynı şekilde, her abak üzerinde yer alan tablo, %1, 2 ve 3 oranlarındaki CBR değerlerine sahip yumuşak malzeme üzerinde, minimum üstyapı kalınlığını feet (1 feet = 30,48 cm) olarak belirtmektedir. Böylece, eğer zeminin altında yumuşak tabakalar ile aynı derinlikte karşılaşırsa, yumuşak malzemenin CBR değerini değerlendirmek için mutlaka deney yapılması gerekmektedir. Eğer tasarlanan üstyapının kalınlığı ve iyileştirilmiş zemin, tablolarda istenen kalınlığa ulaşmazsa yük altındaki konsolidasyonu önlemek için, yumuşak tabakaları kaldırmak gerekli olabilmektedir [5].

Zeminin CBR Değerinin Seçimi

Mühendisler Kurulunun tasarımı, zemin örneklerinin laboratuvarında denendiği, model prototip kavramına dayandırılmıştır. Kompaksiyon (sıkıştırma) gerektiren üç örnek için bir deney programı öngörülmüştür;. Örnekler, değişken nem verileri kullanılarak yoğunlaştırılmıştır. Eğriler topluluğu geliştirilmiştir. Eğriler, inşaat sırasında ortaya çıkabilecek nem ve yoğunluk koşulları doğrultusunda değerlendirilmiştir [5].

Birden fazla zemin türü beklendiğinde, her alan için CBR değerleri seçilmektedir. Eğer zemin alanları tamamıyla ayrı ve ayırt edilir özellikte ise, her alan için tekil üstyapı tasarımları yapılabilmektedir. Üniform dağılan zemin türleri için, tasarımda, en alt CBR değerine sahip zemin esas alınmaktadır.



Şekil 4.4: Tek Tekerlek, Hafif Yüklü Üstyapı İçin Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri

Temel ve Alt temel Malzemeleri

Alt temel çok çeşitli malzeme içerebilmektedir. Bazı durumlarda zemin, alt temele gereksinim duyabilir ya da alt temel gibi çalışması için stabilizasyon ile iyileştirilebilmektedir.

Tablo 4.1' deki veriler, alt temel için kullanılan tasarım değerleridir.

Tablo 4.1' de sunulan gereksinimlere ek olarak, alt temel malzemeleri, tabloda seçilen tasarım değerlerinden fazla olarak laboratuvar CBR değerlerini göstermelidir.

Alt temel malzemesi için CBR tasarım değerleri Tablo 4.2' de gösterilmiştir. Bu değerler, 100 psi lastik basıncı ya da daha düşük ve D tipi trafik alanları için, stabilize agrega haricinde kullanılmaktadır. Kompaksiyon gereksinimlerinin her zaman yerine getirilmesi gerekmektedir [5].

Kaplama ve Temel Kalınlıkları

4.5' den 4.7' ya kadar olan şekillerdeki, tekerlek yükleri için kaplamanın ve temelin minimum kalınlığı Tablo 4.3' de belirtilmiştir. Minimum kalınlık gereksinimi için, çeşitli üstyapı bileşenlerinin kalınlıklarını belirlemek için CBR tasarım kalınlık eğrileri kullanılmaktadır.

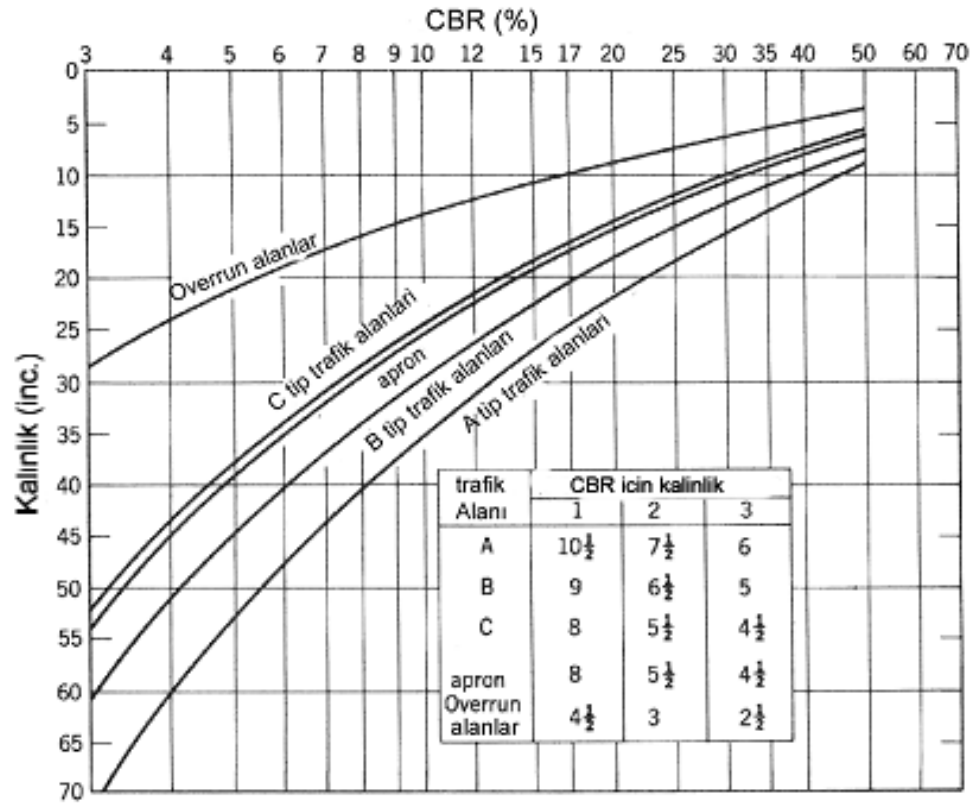
Tablo 4.1: Alt temel Gereksinimleri

MAKSİMUM İZİN VERİLEBİLİR DEĞER						
Malzeme	Maksimum tasarım CBR' 1	Boyut (inç)	Gradasyon gerekliliği (% geçiş)		LL	PL
			No. 10	No.200		
Alt temel	50	3	50	15	25	5
Alt temel	40	3	80	15	25	5
Alt temel	30	3	100	15	25	5
Seçilen malzeme	20	3	-	25	35	12

Not: LL likid limitini, PI plastisite değerini gösterir.

Tablo 4.2: Temel Tabakası İçin Tasarım CBR' 1

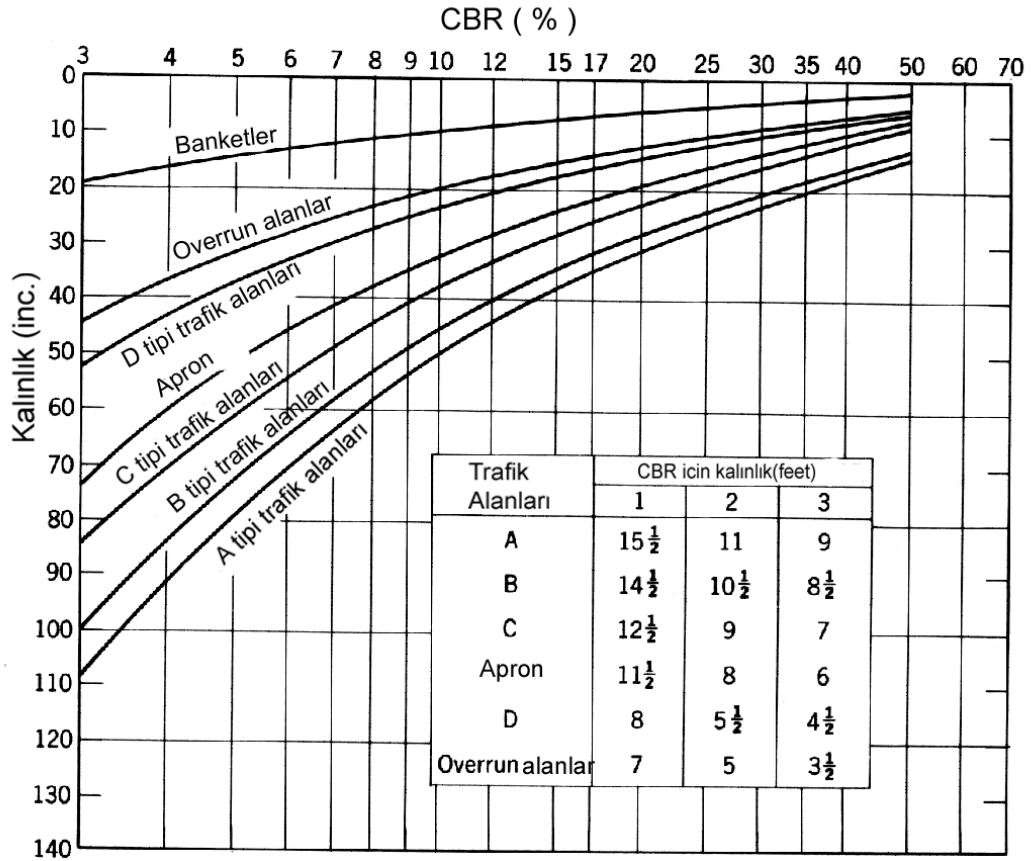
MALZEME TİPİ	TASARIM CBR' I
Kırmataş agrega	100
Suya bağlı makadam	100
Kuru makadam	100
Bitümlü sıvı karışım	100
Kireçtaşı	80
Stabilize agrega	80



Şekil 4.5: Çift Tekerlek Orta Yüklü Üstyapı için Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri, 37 inç boşluk, $A_c = 267 \text{ in}^2$.

Tablo 4.3: Kaplama ve Temel Kalınlık Tasarım Ölçütleri.

AĞIR YÜK TASARIMI						
ÇİFT TANDEM DİNGİL, ÇİFT TEKERLEK; BOŞLUK, 37-62-37 İN. MERKEZDEN MERKEZE; TEMAS ALANI:267 İN ² .						
Minimum kalınlık (in.)						
100-CBR temel				80-CBR temel		
Trafik alanı	Kaplama	Temel	Toplam	Kaplama	Temel	Toplam
A	5	10	15	6	9	15
B	4	9	13	5	8	13
C	4	9	13	5	8	13
D	3	6	9	3	6	9
Apronlar	3	6	9	3	6	9
Banket	2	6	8	2	6	8
Orta Yük Tasarımı						
Çift Dingil, Üç Tekerlek; Boşluk 37 in. Merkezden Merkeze; Temas Alanı 267 in ² .						
Minimum kalınlık (in.)						
100-CBR temel				80-CBR temel		
Trafik alanı	Kaplama	Temel	Toplam	Kaplama	Temel	Toplam
A	4	6	10	5	6	11
B	3	6	9	4	6	10
C	3	6	9	4	6	10
Apronlar	3	6	9	3	6	9
Az Yük Tasarımı						
Tek Dingil, Üç Tekerlek; Temas Alanı, 100 in ² .						
Minimum kalınlık, in.						
100-CBR temel				80-CBR temel		
Trafik alanı	Kaplama	Temel	Toplam	Kaplama	Temel	Toplam
B	3	6	9	4	6	10
C	3	6	9	3	6	9
Apronlar	3	6	9	4	6	10



Şekil 4.6: Çift-tandem, Ağır Yük Üstyapısı İçin Esnek Üstyapı Tasarım Eğrileri, 37-62-37 inç Boşluklu. $A_c = 267 \text{ in}^2$

Don Etkisine Karşı Koruma Tasarımı

Mühendisler Kurulu üstyapı tasarımı için don koşullarından etkilenen iki değişik kavram kullanmaktadır. Bu kavramlar; (1) donma etkisini azaltan ya da yok eden yeterli üstyapıyı sağlayarak, değişken yüzey deformasyonunun kontrolü ve (2) donma-erime sürecinde azaltılmış zemin dayanımının tasarlanmasıdır [5].

Dona karşı mutlak koruma, başlıca üstyapı alanlarında su geçirgenliğinin tehlike yaratacağı durumlarda, çok değişken zemin ve nem koşulları hariç, nadiren kullanılmaktadır.

Zemine nüfuz eden don etkisinin sınırlandırılması, zarar verici koşulları ortadan kaldırmak tüm dona meyilli tabakalar için gereklidir. Bu koşullar zemindeki beklenmedik değişikliklere sebep olmaktadır. Bunun yanında, dona meyilli zeminin

boşluklarının ortadan kaldırılmasını sağlamak için değerlendirmeler yapılabilir. Her durumda don altındaki tüm temel malzemeleri donmaya karşı güçlendirilmelidirler.

Hesaplamalarda kullanılan donma katsayısı on yıllık süreçteki en soğuk yıl ya da 30 yıllık süreçteki en soğuk 3 yıl için ortalama donma katsayısıdır. Donma derecesinin derinliğini belirlemeye yönelik grafikler geliştirilmiştir.

Mühendisler Kurulu Yöntemi ile Tasarım Örneği

Örnekte, orta yüklü havaalanı için A tipi bir trafik alanı tasarlanmıştır. Bu örnek için donmanın sorun teşkil etmediği düşünülmüştür. Malzeme özellikleri Tablo 4.4’de, kohezif zemin için gerekli olan kompaksiyon ihtiyacı derinliği Tablo 4.5’ de gösterilmiştir [5].

Bu problem için don, bir tasarım değerlendirmesi olmadığından normal dayanım analizleri gerekli olan tek kalınlık ölçütüdür.

Tablo 4.4: Malzeme Özellikleri

MALZEME	DENEY CBR’I (%)	% ELEKTEN GEÇEN		LL (%)	PL(%)
		No. 100	No.200		
Zemin	6	-	-	35	15
Zemin	10	-	-	35	15
(Sıkıştırılmış)	24	85	13	19	5
Zemin No.1	59	44	8	15	4
Zemin No.2					
Temel (iyi derece kırmataş malzeme)					
Kaplama (sıcak asfalt karışım)					

Tablo 4.6’ da bu problem için tasarım verileri özetlemiştir. İki alt temel malzemesi için kullanılan tasarım, CBR değerleri için özel dikkat gerekmektedir. 1 No.lu alt temel için malzeme özellikleri Tablo 4.1’den görüldüğü üzere, maksimum tasarım CBR değeri olan % 30’a izin vermelidir. Bununla beraber CBR = % 24 mevcut deney değerinin altında olduğu için, test edilen bu değer tasarım girdisi olarak kullanılmaktadır. 2 No.lu alt temel için, malzemenin maksimum tasarım CBR’ı %

50 olmalıdır. Bu değer mevcut % 59 CBR testi sonucundan az olduğundan, son tasarım CBR değeri % 50'dir.

Tablo 4.5: Kompaksiyon Derinliği

KOMPAKSİYON YÜZDESİ	100	95	90	85	80
Kompaksiyon derinliği (in.)	24	36	48	66	78

Tablo 4.6: Tasarım Verileri

MALZEME	TASARIM CBR' I	TABAKA ÜSTÜ KALINLIK(İN.)	ŞEKİL
Zemin	6	47	Şekil 4.5
Zemin (sıkıştırılmış)	10	35	Şekil 4.5
Alt temel No.1	24 ^a	18	Şekil 4.5
Alt temel No. 2	50 ^b	9	Şekil 4.5
Temel	100 ^c	6 (min)	Şekil 4.2
Kaplama	NA	4 (min)	Şekil 4.2

^a mevcut CBR deney sonuçları Tablo 4.1'den

^b maksimum CBR Tablo 4.1' den

^c Tablo 14.2'den.

Gösterilen sonuçları kullanarak normal tasarımın 4 inç (10,16 cm) A.C, 6 inç (15,24cm) taneli temel tabakası, 8 inç (20,32 cm) 2 No.lu alt temel ve 17 inç (43,18 cm) 1 No.lu alt temel tabakası olması beklenir. Bu 35 inç (89 cm) lik toplam kalınlık sıkıştırılmış zemindeki kayma deformasyonunu engellemek için gereklidir. Zeminin sıkıştırılmış kalınlığı, yüzde kompaksiyon gereksinimleri en az % 95 oranında olarak, 12 inç (30.48 cm) olmalıdır. Doğal tabaka en az % 90 oranında, 47 ila 66 inç (119 ila 167 cm) derinlik arasında modifiye AASHTO yoğunluğuna sahip olmalı ve bu derinlik altı % 80 oranında yoğunluğa sahip bulunmalıdır. Eğer bu kompaksiyon gereksinimleri ile karşılaşılmadıysa; (a) doğal tabaka ya mekanda sıkıştırılmış olmalı, (b) ya kaldırılıp tekrar yeni bir malzemeyle doldurulmalı, (c) ya da üstyapı yapısının kalınlığı arttırılarak yoğunluk-derinlik ölçütü sağlanmaya çalışılmalıdır

4.2.2 Federal Havacılık İdaresi (FAA) Yöntemi

Amerika'daki sivil havaalanları, FAA'nın tavsiye niteliğindeki standartları doğrultusunda tasarlanmıştır [25]. Burada açıklanan yöntem, 30000 pound (13,6 ton) u aşan ağırlığa sahip uçaklarda uygulanabilmektedir. Bu yükten daha hafif uçaklar için, FAA'nın tali havaalanları için tasarladığı yöntem kullanılmaktadır.

Taban zemini CBR deneyleri tasarım koşullarını değerlendirmek için kullanılmasına rağmen, FAA tasarım yöntemi esasen taban zeminini sınıflandıran tipteki sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem; FAA zemin sınıflandırma sistemine, kaplama altı drenaj koşullarına ve mevcut (ya da mevcut olmayan) don problemlerine dayanarak, zemin tipini sınıflandırmaktadır. Böylece, önerilen yöntemle dayanarak büyük ölçüdeki havaalanı üstyapıları, sadece zemin sınıflamasına ve çevresel faktörlerin nitel değerlendirmesine göre tasarlanmaktadır [25].

Genel tasarım esası; üstyapı malzemesinin özelliklerini (taban zemini olduğu kadar, üstyapı bileşenlerini), kritik uçak yükü etkilerini (uçanın ağırlığı ve tekerlek düzeni) trafik hacmini (uçak kalkış sayısı) ve donma koşullarını değerlendiren bilgileri içermektedir [25].

Taban Zemini

Taban zemini, tasarım amaçlarına göre Tablo 4.7' de gösterilen sistemle sınıflandırılmıştır. Taban zemini sınıfının tasarımı, drenaj ve donma koşullarının değerlendirilmesi sonucu belirlenmiştir [5].

Tabloda dikkati çeken, sadece taneli taban zeminlerinin (E-1' den E-4' e) "iyi drenaj" koşulunu sağlama potansiyeline sahip olmasıdır. Bununla beraber, yüksek yer altı suyu seviyesi durumunda bu malzemeler, nispeten düz arazide ya da geçirimsiz tabakada "düşük drenaj" sağlamaktadır. Beklenen don derinliğinin, üstyapı kalınlığından büyük olması halinde, 'don olayı' gerçekleşmektedir [5].

Tablo 4.7: Esnek Üstyapılar için FAA Taban Zemini Sınıfları^a

Zemin Sınıfı				
Zemin Sınıfı	İyi Drenaj		Kötü drenaj	
	Don olmayan	Don olan	Don olmayan	Don olan
E-1	F _a	F _a	F _a	F1
E-2	F _a	F _a	F1	F2
E-3	F1	F1	F2	F3
E-4	F1	F1	F2	F4
E-5			F3	F5
E-6			F4	F6
E-7			F5	F7
E-8			F6	F8
E-9			F7	F9
E-10			F8	F10
E-11			F9	F10
E-12			F10	F10
E13			Zemin için uygun değil	F10

^a resmi olmayan Federal Havacılık İdaresi.

Tasarım mühendisleri tarafından avantajlı olarak değerlendirilen CBR deneyleri taban zeminine uygulanabilmektedir. Bunun yanı sıra bir CBR değeri seçildikten sonra, Tablo 4.8’ deki tasarım verilerine bağlı kalarak FAA taban zemini sınıfına dönülebilmektedir.

Stabilize zeminin (kireç, çimento, bitüm) kullanımı ancak nem ya da donma koşulları beklendiğinde gerekli olmaktadır [5].

Üstyapı Malzeme Bileşenleri

Tablo 4.9, esnek üstyapı bileşenleri için çeşitli FAA malzeme tiplerini göstermektedir. Tabaka eşdeğerlik oranları, sadece bitümlü temel tabakası, çimento stabilize temel ya da alt temel için, (1,0 inç (2.54 cm) stabilize malzemenin 1,5 inç (3.84 cm) stabilize olmayan malzemeye eşdeğer olmasına dayanarak)

kullanılmaktadır. Bu stabilize tabakaların asgari kalınlığı, herhangi bir üstyapı alanında, bitümlü 4 inç (10.16 cm), çimento stabilize olarak 6 inç. (15.24 cm) tir [5].

Tablo 4.8: CBR – FAA Zemin Sınıf Benzerlikleri

FAA SINIFI	F10	F9	F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	F _A
CBR	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	10	12	14,5	18	20

Tablo 4.9: Üstyapı Malzemelerinde FAA Tanımı^a

KAPLAMA	TEMEL	ALT TEMEL
P-401 ^c Asfalt Betonu ^b	P-201 Bitümlü temel P-209 Kırmataş malzeme P-210 Kaliş P-211 Kireç taşı P-212 Shell P-214 Penetrasyon makadam P-215 Emülsiyon asfalt agrega P-304 Çimento stabilize	P-154 Granüler alt temel P-205 ^d kuru-bağlı makadam P-206 ^d su-bağlı makadam P-208 ^d Agrega P-213 ^d Kumlu kil P-216 ^d Yerinde karışım P-301 ^d Çimento stabilize

^a FAA'dan AC 150/5320-6B

^b eğer yüzey benzin ya da solvent dökülmesine maruz kaldıysa, P-625 “solvente dirençli tabaka” kullanılır..

^c detaylı malzeme açıklamaları için FAA 150/5370-1A'a bakınız.

^d ikincil havaalanı üstyapıları için temel tabakası olarak kullanılabilir.

Tasarım Uçağının Belirlenmesi

Her tip uçağın yıllık kalkış sayısı ayrı ayrı tahmin edildikten sonra, tasarım uçağı (kritik uçak) belirlenmektedir. Çünkü bir havaalanı çok değişik tipte ve sayıdaki uçaklar tarafından ayrı ayrı kullanıldığı için, tek bir uçak cinsinden (yani seçilen bir tasarım uçağı cinsinden) toplam kalkış sayısı belirlenmelidir. Bunun için FAA en kalın üstyapı kalınlığını gerektiren uçak tipinin tasarım uçağı olarak seçilmesini önermektedir. Yani tasarım uçağı için en ağır uçak tipi değil, en fazla üstyapı kalınlığını gerektiren uçak tipi deneme-yanılma yoluyla saptanmalıdır [12].

Tasarım uçağı ile eşdeğer yıllık kalkış sayısının belirlenmesi için önce üstyapıyı kullanacak tüm uçakların tasarım uçak tipine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun

için Tablo 4.10’ da dönüşüm katsayıları verilmiştir. Üstyapıyı kullanan uçaklar aynı tip uçağa dönüştürüldükten sonra, Eşitlik 4.4 kullanılarak tasarım uçağının yıllık kalkış sayısına dönüştürülmelidir [12].

Eşdeğer kalkışları belirlemek için, FAA yöntemi aşağıdaki eşitliğe dayandırılmıştır:

$$\text{Log}(R_t) = \left(\frac{W_i}{W_t} \right)^{0.5} \log(R_i x F) \quad (4.4)$$

Burada;

R_t : Tasarım uçağının yıllık eşdeğer kalkış sayısı,

R_i : Tasarım uçağına dönüştürülecek uçağın yıllık kalkış sayısı,

W_t : Tasarım uçağı tekerlek yükü,

W_i : Tasarım uçağına dönüştürülecek uçağın tekerlek yükü olarak ifade edilmektedir.

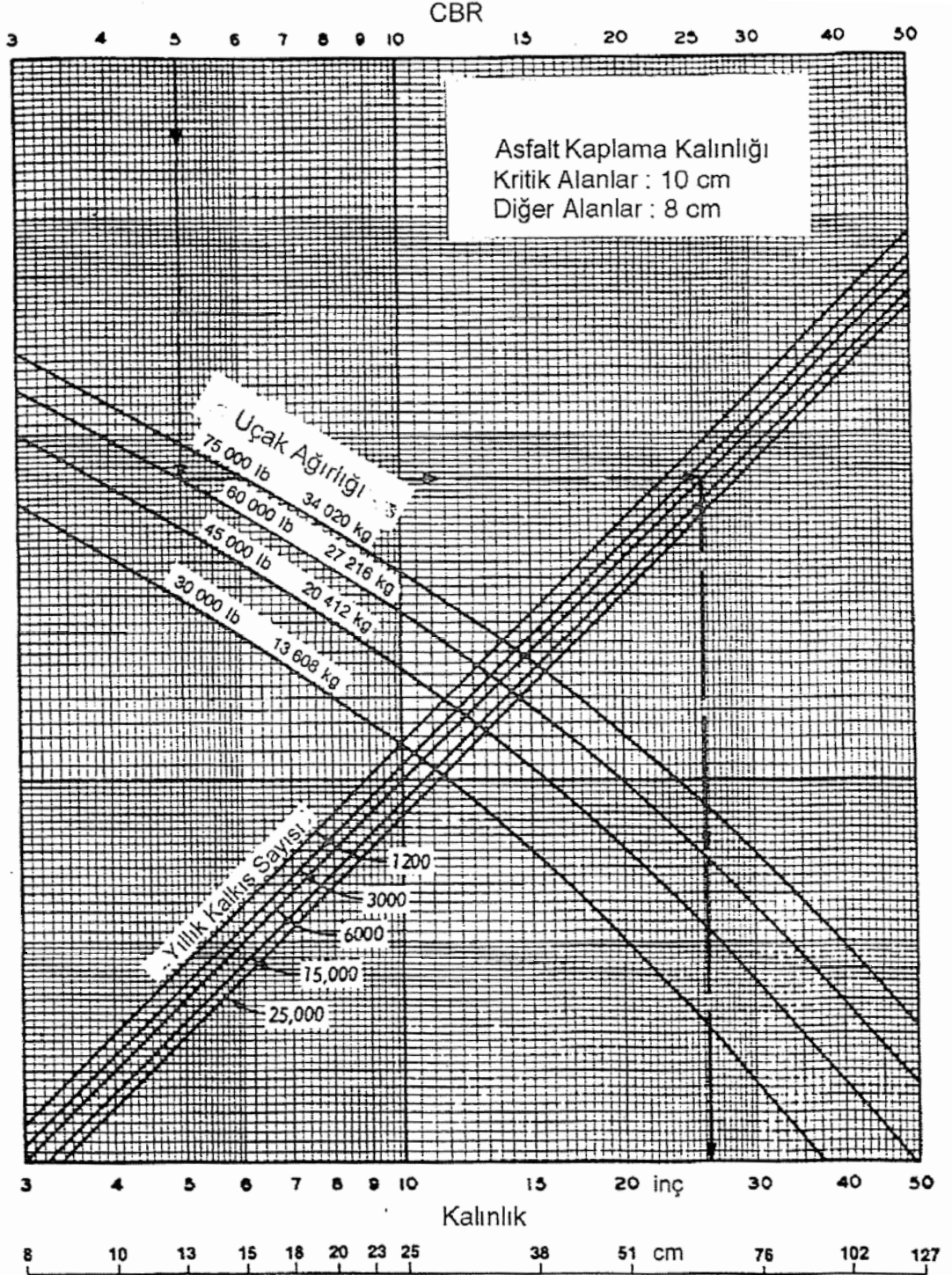
Tablo 4.10: Tasarım Uçağına Dönüşüm Katsayıları (FAA)

UÇAK TİPİNDEN	UÇAK TİPİNE	DÖNÜŞÜM KATSAYISI (F)
Tek tekerlek	Çift Tekerlek	0,80
Tek tekerlek	Çift Tandem	0,50
Çift tekerlek	Çift Tandem	0,60
İki Çift tandem	Çift Tandem	1,00
Çift Tandem	Tek tekerlek	2,00
Çift Tandem	Çift tekerlek	1,70
Çift Tekerlek	Tek Tekerlek	1,30
İki Çift Tandem	Çift Tekerlek	1,70

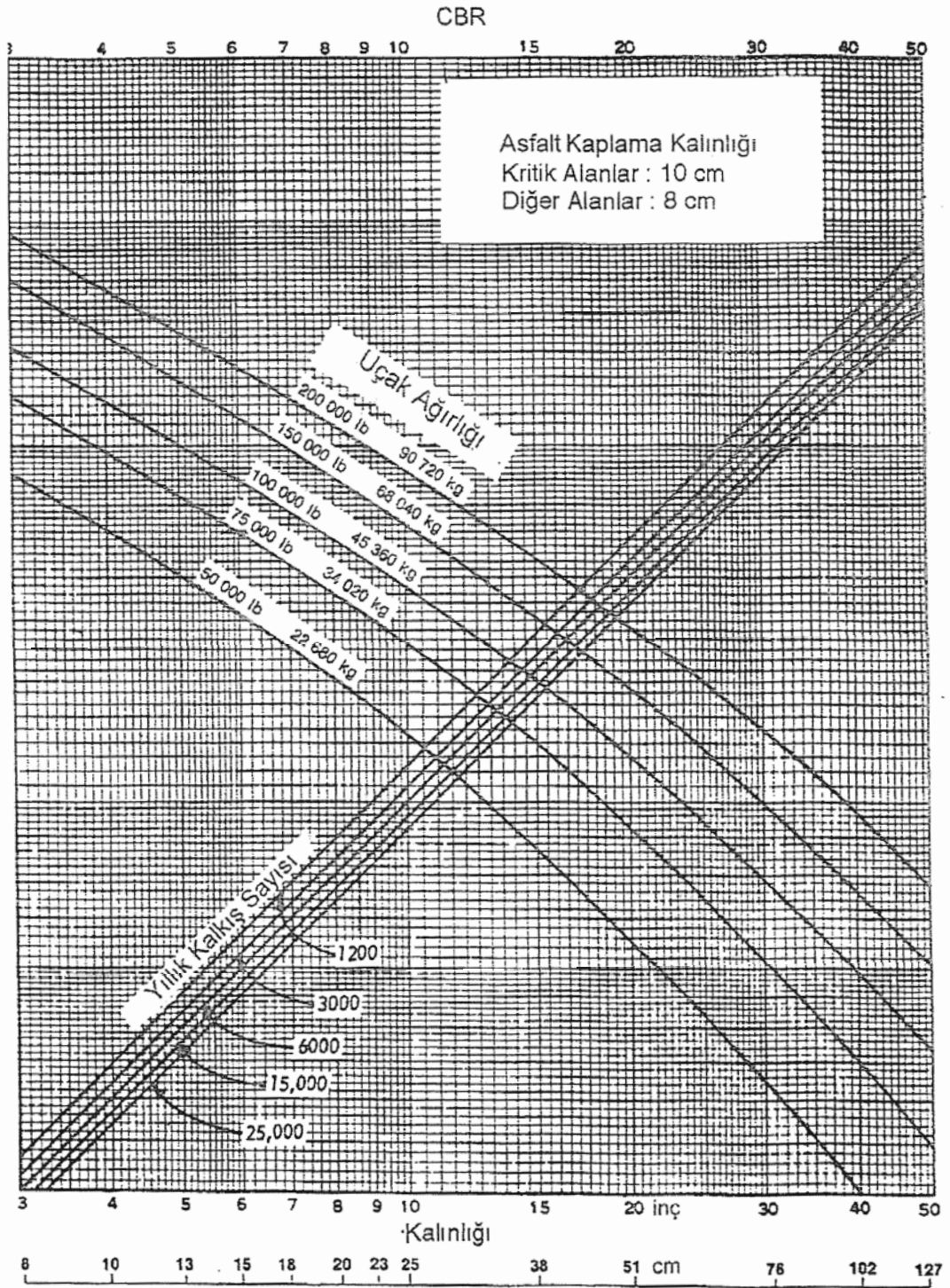
Tasarım Eğrileri

Bu eğriler yükün % 95’inin ana dingil tarafından taşındığını ve uçağın toplam ağırlığına dayandığını varsaymaktadır [5]. Sonuçta oluşan, tekli, çiftli ve çift tandem dingilli uçaklara ait tasarım eğrileri Şekil 4.7’den 4.9’a kadar gösterilmiştir. Bu tasarım eğrileri, zeminin CBR değeri, uçak ağırlığı, yıllık kalkış sayısına ve 20 yıllık

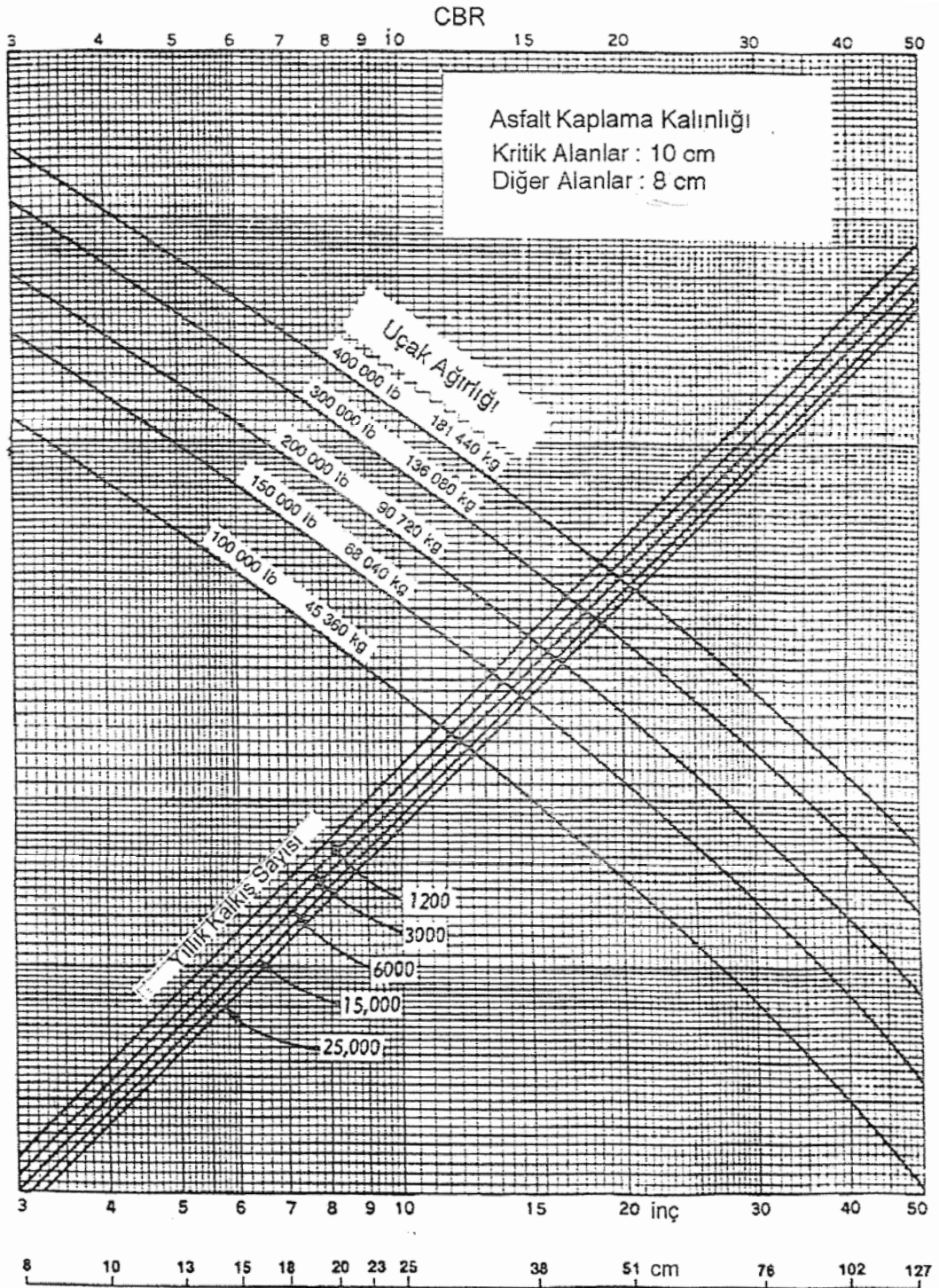
üstyapı ömrüne göre toplam üstyapı kalınlığı ve kaplama kalınlığını vermektedir. Bu eğriler, 30000 pound (13,6 ton)'u aşan yüklerde uygulanabilmektedir.



Şekil 4.7: Federal Havacılık Yönetimi, Tek Tekerlekli Uçaklar için Tasarım Eğrileri



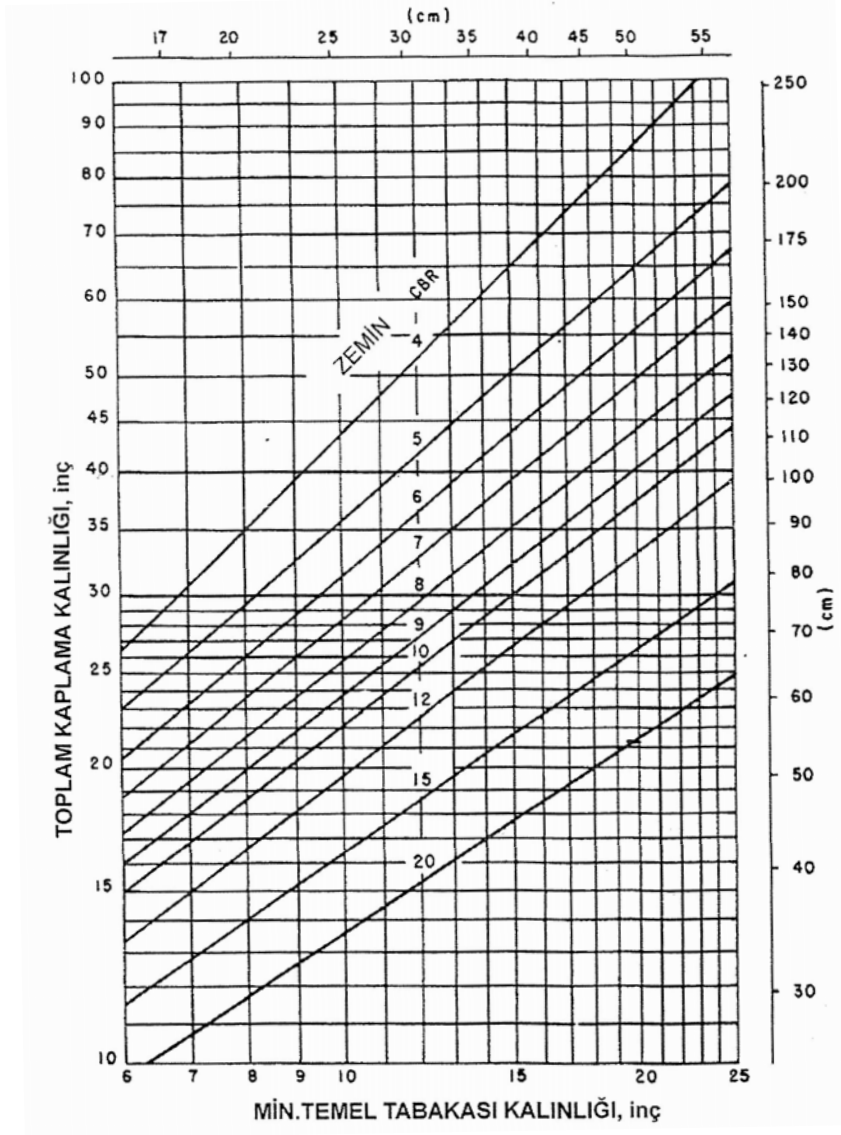
Şekil 4.8: Çift Tekerlekli Uçaklar için Federal Havacılık Yöntemi Tasarım Eğrileri



Şekil 4.9: Çift Tandem Tekerlekli Uçaklar için Federal Havacılık Yönetimi Tasarım Eğrileri.

Şekil 4.10'da, minimum temel tabakası kalınlıkları verilmiştir. Buradan toplam üstyapı kalınlığı ve zemin CBR değeri ile minimum temel tabakası kalınlığı bulunmaktadır. FAA tasarım abakları ile toplam esnek üstyapı kalınlığı ve kaplama

kalınlığı bulunmakta, aradaki fark kadar temel ve alt temel tabakası yapılmaktadır. Eğer yıllık uçak kalkış sayısı 1200' den fazla ise, toplam üstyapı kalınlığı, Tablo 4.11' de belirtilen değerler kadar arttırılmalıdır [12].

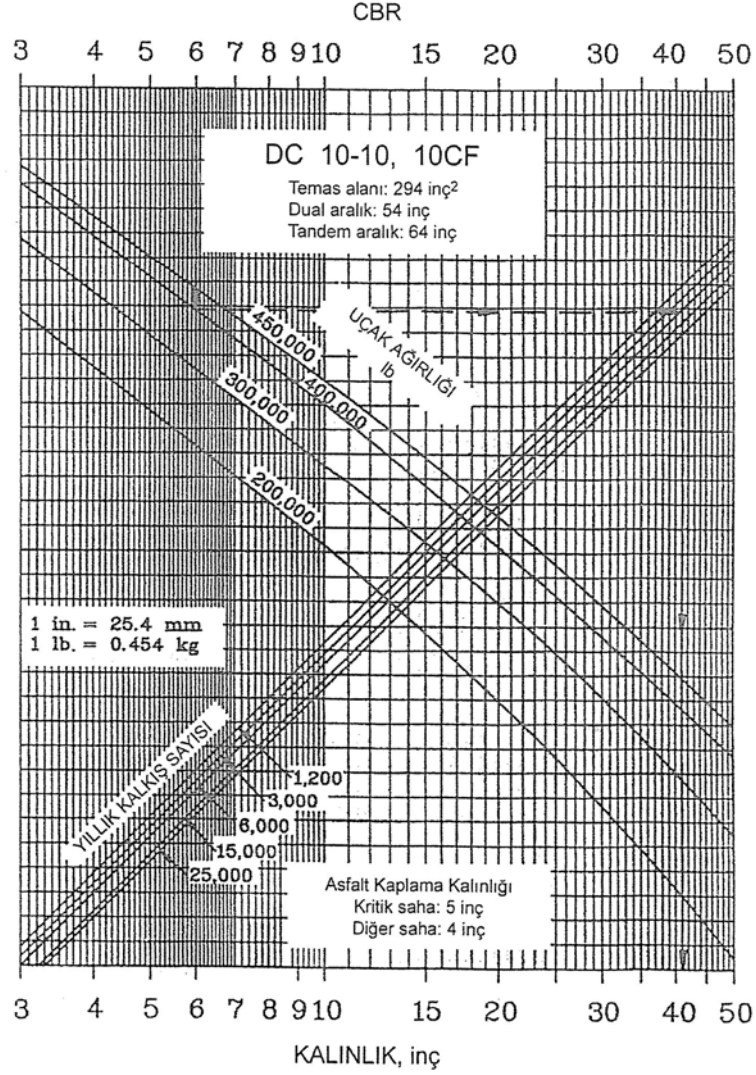


Şekil 4.10: Minimum Temel Tabakası Kalınlığı

Tablo 4.11: Temel ve Alt temel Kalınlık Yüzdelerinin Artışları

YILLIK EŞDEĞER KALKIŞ SAYISI	(1200-3000)	(3000-6000)	(>6000)
% kalınlık artışı	10	20	30

Birçok geniş gövdeli jet uçakları için, Şekil 4.7' den 4.9' a kadar olan eğrilerin kullanılması kabul edilmemektedir. Geniş gövdeli jet uçakları için, ayrıca tasarım eğrileri geliştirilmiştir. Şekil 4.10' da geniş gövdeli jet uçaklarından DC-10-10 için tasarım eğrisi gösterilmektedir [5].



Şekil 4.11: DC-10-10 için Federal Havacılık Yönetimi Tasarım Eğrileri

Don Etkisi

FAA, donma tasarımı için, Mühendisler Kurulu yöntemindekine benzer olarak dayanım ve giriş koşullarını düşürmesini önermektedir [5]. En basit tanım ile “donma” durumu, belirli bir alanın donma nüfuz derinliğinin, beklenen tasarım kalınlığından daha büyük olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Beklenen donma

seviyesine göre derinlik, tasarım kalınlığından daha az ise, donma gerçekleşmemektedir.

“Donma” koşullarında tasarım için, donmanın derinliği üstyapı tasarım kalınlığını geçtiğinde, FAA, donma etkisini yok etmek için, donmaya dirençli alt temel malzemesinin uygulanması gerekliliğini önermektedir. Son olarak; Mühendisler Kurulu yöntemi, özellikle birçok üstyapı ve üniform zemin koşulları için azaltılmış dayanım ve şişme arasında minimum don kalınlığına izin vermektedir. Bu, FAA’nın kabul ettiği bir durum değildir [5].

FAA Yöntemi ile Tasarım Örneği

Problem, taksiyolu için gerekli olan esnek üstyapının, FAA yöntemine uygun olarak tasarlanmasıdır[5]. Tasarım uçağı 180kip (180000 lb) net ağırlığında, çift tekerlekli üçlü dingil sistemine sahiptir. Beklenen uçak trafiğı analiz edilmiş ve sonuçlar, tasarım uçağının yıllık eşdeğer 650 kalkışı olduğunu göstermiştir. Taban zemini E-7 olarak sınıflandırılmıştır. Yüksek su seviyesi taban zemini yüzeyinde mevcuttur ve don derinliği yaklaşık 30 inç (76,2 cm) tir.

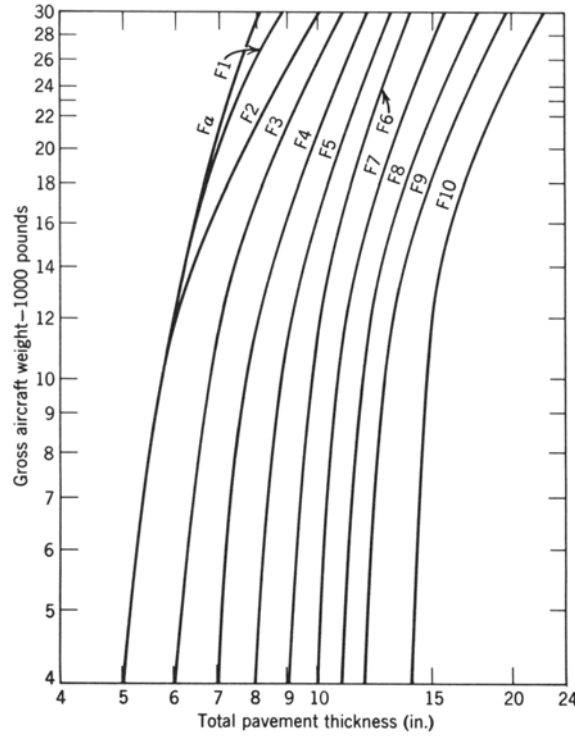
Trafik analizlerinin sonucu yıllık kalkışlar 1200 den daha azdır. Bu gerçek tasarım kalınlığının, başka herhangi bir kalınlık gereksinimine ihtiyaç duyulmadan Şekil 4.8’den elde edilmesine izin vermektedir. Tablo 4.7’ ye göre; taban zemini tasarımı “don olmayan” koşullar için F5 (CBR= 8,5) ve “don” koşulları için F7 (CBR= 6,5) sınıfıdır. Şekil 4.8’ e göre, 180k net ağırlık değerlerini gösteren bu gereksinimleri kullanarak, donma ve donmama koşulları için üstyapı kalınlığı gereksinimleri 28,5 inç (72,4cm) ve 37 inç (94 cm)’tir. Don derinliği, donmama koşullarında hesaplanan üstyapı kalınlığından büyük olduğu için, F7 don oranı kritik taban zemini koşuludur.

CBR= 6,5 ve 37 inç (94 cm) lik üstyapı kalınlığı için, minimum temel kalınlığı Şekil 4.8’den 12 inç. (30.5 cm) tir. Üstyapı tabakaları; 4 inçlik (10cm) kaplama, 12 inç (30,5 cm) lik kırmataş temel ve 21 inç (53 cm) lik granüler alt temelden oluşmaktadır.

İkincil (Genel Havacılık) Havaalanları

Genel havacılık, havacılık sahasının hava taşımacılığı ve programlı hava taksi servisleri hariç, tüm bileşenlerini içeren sivil havacılık bölümüyle ilgilidir. Bu kullanımların içeriği; charter servisleri, iş, ticari ve kişisel (eğlence) amaçlı durumlardır. Bu amaçlar için nadiren uçan uçakların birçoğu 30kip (13608 kg) ağırlığın altındadır.

FAA tasarım eğrilerinden Şekil 4.12, sadece 30k'den daha az ağırlığa sahip uçaklar için uygulanabilir. Taban zemini dayanımı, daha önce de açıklanan havaalanı üstyapı tasarımı için açıklanan işlemlere dayanmaktadır. Donma etkileri, taban zeminin “donma” sınıflandırmasının kullanımı için oluşturulmuştur. Tasarım eğrilerinin 5000 kalkış sayısı için uygulanabilir olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 4.12: Federal Havacılık Bölümü Tasarım Eğrileri – Hafif Uçaklar

4.3 Analitik Yöntemler

4.3.1 Asfalt Enstitüsü Yöntemi

Asfalt enstitüsü havaalanı üstyapı tasarım kılavuzunu (MS-11) bilgisayar programları çözüm kılavuzuna bağlı kalarak 1973'te yayınlamıştır [27, 28]. Bu yöntem sadece 60 kip (270 KN) net ağırlıktan fazla uçaklar için ve tam-derinlikli asfalt üstyapı tasarımı ile uygulanabilmektedir. Diğer birçok havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerine karşılık, bu tasarım yöntemi, kritik ya da tasarım uçağı seçiminden çok, karmaşık trafik analizi kavramlarını kullanmaktadır. Bu yöntem, pist tasarımlarında sıkça kullanılan trafik analizleriyle kavramsal olarak benzerlik taşımaktadır. Trafik analizinde, uçakların şekil-değiştirme tekrar sayıları, seçilmiş “ standart” bir uçağın ürettiği eşdeğer şekil-değiştirme tekrar sayısına dönüştürülür. Standart uçak, 358000 lb (1590 kN) ağırlığında DC-8-63F' tir ve buna bağlı olarak 22 tip uçağın üstyapı deformasyon etkileri, kılavuzda verilmiştir [5].

Tasarım Yönteminin Esası

Tasarım, tam-derinlikli asfalt üstyapının, çok tabakalı elastik bir sistem olduğu ve üstyapıya uygulanan yüklerin iki kritik elastik deformasyon üreteceğine yönelik teoriye dayanmaktadır. Bu deformasyonlar, asfalt betonu seviyesinin en altındaki yatay gerilme deformasyonu, ε_t ve taban zemini tabakasının en üstünde yer alan düşey basınç deformasyonlarıdır, ε_c . Her deformasyon, tasarım analizinde ayrı ayrı incelenmektedir. Tüm kritik deformasyonlar için izin verilebilir maksimum değerler anlamındaki tasarım kriterleri, kritik asfalt betonu elastisite modülüyle (E_1) değerlendirilmekte ve tasarım kalınlığını seçmenin temelini oluşturmaktadır [5]. Asfalt betonu tabakasının yorulma çatlakları için deformasyon ölçütü Kingham bozulma kriterlerine dayanmaktadır [29]. Sıkıştırılmış taban zemini deformasyon ölçütü, üstyapının, Mühendisler Kurulunun CBR analizleri için üretilen tasarım eşitliğinden yararlanılarak, çok tabakalı analizlerinden (multilayered system) geliştirilmiştir [28].

Asfalt betonu elastisite modülünün, sıcaklıktan bağımsız olması nedeniyle, yıllık üstyapı potansiyel deformasyon miktarı, her coğrafik konumun sıcaklığına paralel

olarak değişkenlik göstermektedir. Kalıcı deformasyonun ε_c , değeri, üstyapı sıcaklığı yüksek ve asfalt betonu modülü en düşük iken, maksimumdur. Tam tersine; ılıman koşullarda asfalt betonu modülü yüksek iken, asfaltın tabanındaki yatay gerilme deformasyonu ε_t , çatlamanın tekrarlaması açısından kritiktir. Bu ısı etkilerinden dolayı, beklenen tasarım kalınlıkları, farklı çevresel koşullarda değişkenlik göstermektedir. Asfalt Enstitüsü kılavuzunda, her deformasyon ölçütü için yıllık hava sıcaklığı ve üstyapı kalınlıkları (T_A) arasındaki ilişki ile ilgili tasarım analizleri oluşturulmuştur. Yıllık ortalama hava sıcaklığı arttıkça, T_A , üstyapı kalınlığı artmaktadır. Diğer taraftan, yorulma ölçütünü karşılamak için, serin koşullarda daha kalın üstyapılara ihtiyaç duyulmaktadır [28].

Asfalt Enstitüsü tasarım yöntemi böylelikle, tahmin edilen üstyapı sıcaklığı dağılımı, asfalt betonunun ve taban zemininin malzeme özellikleri, deformasyon ölçütünün, kritik deformasyonlar altında gelişimi ve karmaşık uçak trafik etkileri arasındaki ilişkilere bağlıdır [28].

Sıcaklık Dağılımı

Deformasyon ve çatlama alt sistemleri için olan bu tasarım yöntemi, toplam deformasyon teorisinin kullanımına dayanmaktadır. Bunun yanında verilen herhangi bir konum için yıllık üstyapı sıcaklık dağılımı önemlidir. New York, Maryland ve Arizona'da gerçekleştirilen saha sıcaklık çalışmalarının sonuçlarına dayanarak, verilen belirli bir derinlikteki asfalt betonu tabakası için, aylık hava sıcaklığı ve aylık üstyapı sıcaklığı karşılaştırılarak geliştirilmiştir [5]. Birinci karşılaştırmanın sonuçlarına göre; toplamda aylık ortalama üstyapı sıcaklığının, aylık hava sıcaklığının aritmetik ortalaması ile ilişkisi;

$$\text{MMPT} = 1.05 \text{ MMAT} + 5 \quad (4.5)$$

ifadesiyle verilmiştir. Burada, MMPT aylık üstyapı sıcaklığı ve MMAT aylık ortalama hava sıcaklığıdır.(ortalama kalınlık > 10 inç (25,4 cm) A.C üstyapı)

Malzeme Özellikleri

Asfalt betonunun elastisite modülü sıcaklık ve yük tekrarının fonksiyonudur. Belirli modül ilişkisini belirlemek için, birçok malzeme üzerinde dinamik modül çalışmaları yapılmıştır. Tasarım amacıyla; tipik çift tandem dingil için 2 hertzlik bir yük frekansı ($f = 2$ cps) seçilmiştir. Sonuçta oluşan eşitlik asfalt beton modülünü (E_1) belirlemek için kullanılmış olup;

$$E_1 = \frac{K_0}{K_1^{q^{d_1}}} \quad (4.6)$$

şeklindedir. Burada q , sıcaklık, K_0 , K_1 ve d_1 sabitleri sırayla 3.8×10^6 , 1.0046 ve 1.45 tir. Sıcaklık analizleri ve eşitlik sonuçlarına dayanarak, bilinen çevresel koşullarda herhangi bir üstyapı sıcaklık frekans dağılımını oluşturmak mümkündür [5].

Deformasyon Ölçütleri

Orijinal Kingham yorulma ölçütü [29] AASHTO yol deneyinden elde edilen asfalt üstyapı analizlerinden geliştirilmiştir. Ölçütler, Asfalt Enstitüsü yönteminde kullanılan gerilme ifadesinin geliştirilmesi için değiştirilerek kullanılmıştır. Bu, izin verilen yük tekrar sayısının, belirli sıcaklıktaki sayısız deformasyonu ifade eden, yorulma ölçütü eşitliği;

$$N_{f_q} = ab^{q^{d_1}} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (4.7)$$

$$a = 1,86351 \times 10^{-17}$$

$$d_1 = 1,45$$

$$b = 1,01996$$

$$q = \text{üstyapı sıcaklığı (}^\circ\text{F)}$$

$$c = 4,995$$

$$\varepsilon_t = \text{asfalt karma gerilme deformasyonu}$$

şeklindedir.

Görüldüğü gibi; bu eşitlik standart laboratuvar deneylerinden elde edilen standart ($N_f = K(1/\varepsilon)^c$) eşitliğidir.

Herhangi bir problemde çok tabakalı gerilme-deformasyon problemlerini çözmek için gereken tasarım ihtiyacını azaltmak için, standart bir uçak (DC-8-63F, 358000 lb) seçilmiştir. Bu uçak için çok tabakalı regresyon analizleri ile, maksimum gerilim deformasyonu için bir ifade geliştirilmiştir;

$$\varepsilon_t = \frac{M_0}{h_1^{A_1} E_1^{A_2} E_2^{A_3}} \quad (4.8)$$

h_1 = Tam-derinlikli üstyapının kalınlığı (in).

E_1 = A.C elastisite modülü (psi)

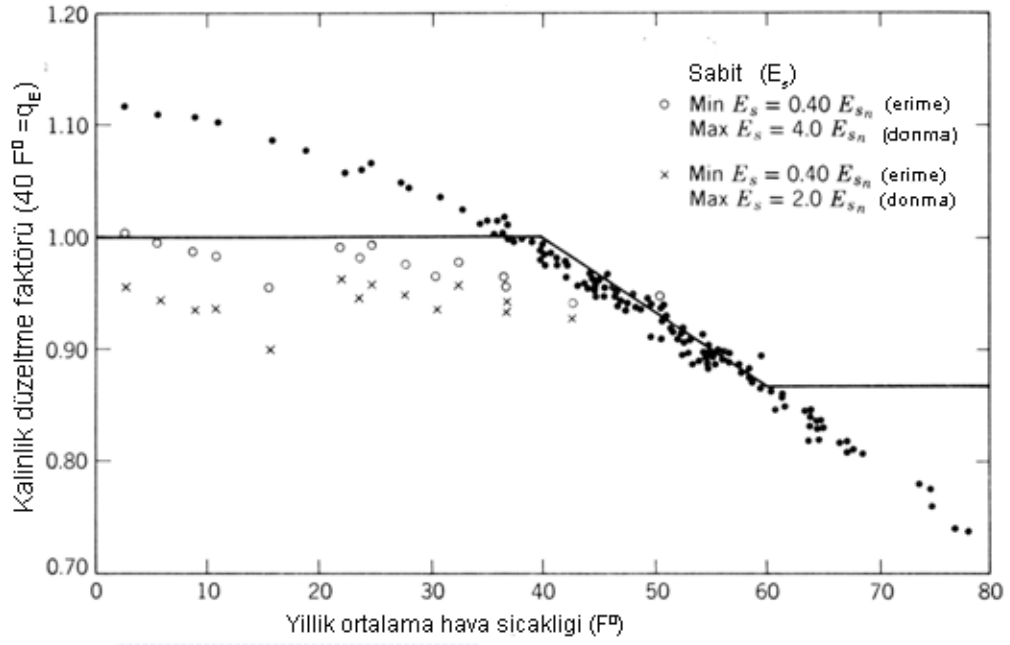
E_2 = taban zemini modülü (psi)

M_0 , A_1 , A_2 ve A_3 sabitleri; 1.086×10^3 , 1.19967 , 0.66866 ve 0.320867 değerlerine sahiptir.

4.5' den 4.8' e kadar olan eşitlikler, aylık toplam deformasyon çalışmalarına dayanan T_A (üstyapı kalınlığı) eşitliğini tasarlamayı sağlamıştır. Yük tekrarı, zemin reaksiyon modülüyle ve izin verilen sıcaklıkla ifade edilen bu eşitlik, değişken aylık zemin reaksiyon modülleri ve sıcaklık frekansına bağlı olarak aylık deformasyonu incelemektedir. Şekil 4.13' de verilen bu çalışmanın sonuçları; herhangi bir çevresel koşul için T_A tasarım kalınlığı, yıllık standart hava sıcaklığı ortalamasının ve kalınlık azaltma faktörünün kullanımına dayandığını göstermektedir [5].

Tablo 4.12 yorulma tasarım eğrilerinin gelişiminde kullanılan, sınırlı gerilme deformasyonlarını özetlemektedir. Bozulmalara neden olan bir çok yük tekrarı için, izin verilebilir gerilim deformasyonları belirtilmiştir. Bu ölçüt kullanıldığında, sınırlı 1.450.000 psi.lik Asfalt betonu modülünün ve Poisson oranının, gösterilen tüm tabakalar için, çok tabakalı analizlerde kullanılması zorunludur. Çevresel koşullar için, T_A kalınlığındaki düzenlemeler Şekil 4.13' de verilen yaklaşık T_F değeriyle yapılmıştır [5].

Ayrıca tasarımda, üstyapı tasarım sıcaklığı ve asfalt betonu elastisite modülü için Şekil 4.14 ve 4.15' de verilen eğriler kullanılmaktadır.



Şekil 4.13: Yorulma Kalınlığı İçin Kalınlık Ayarlama Faktörleri.

Tablo 4.12: Sınırlı Gerilme Deformasyonları Ölçütü

N_F	ϵ_i^a	E_1	ν_1	ν_2	MAAT ^b (F^0)	T_F
100	420	1.450.000psi	0,40	0,45	40	1.00max
1000	260				60	0.866min
10.000	165					
100.000	105					
1000000	76					

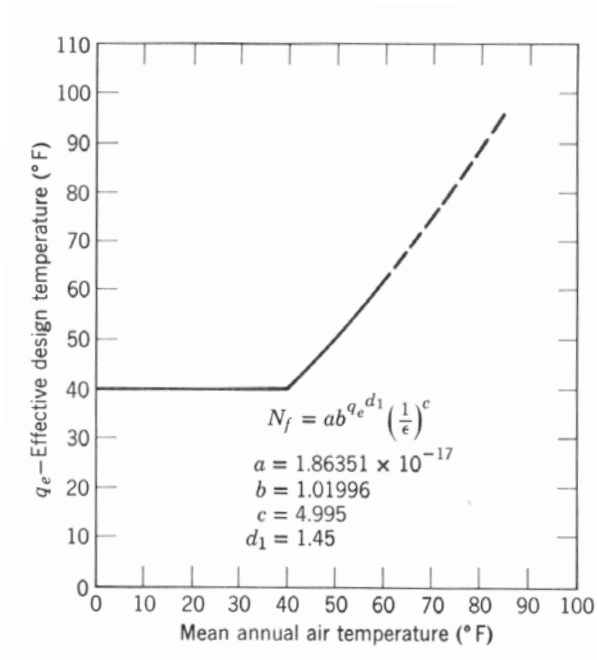
^a Gerilmeler mikroinç/inç

^b Ortalama hava sıcaklığı

Şekil 4.13, Eşitlik 4.7' deki etkili tasarım sıcaklığına (q_e) bağlı birçok yük tekrarının gerilme sonuçlarından üretilen deformasyonları (N_f) göstermektedir.

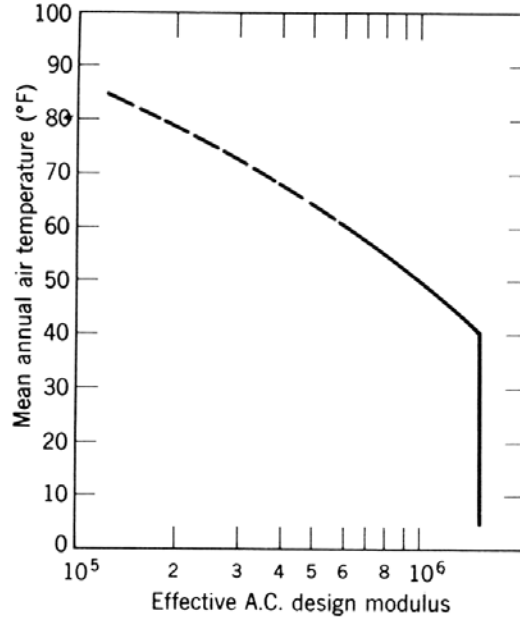
Tablo 4.9'da ki ölçüt ve Eşitlik 4.7 kullanılarak, standart DC-8-63F tipi uçaklar için ortalama yıllık hava sıcaklığı ve taban zemini modülü ile, tasarım T_A yorulma eğrileri geliştirilmiştir. Bu eğriler Şekil 4.16'da gösterilmiştir [5].

Kalıcı deformasyon ölçütü, taban zemininin tepesindeki düşey basınç gerilmesine (ϵ_c) dayandırılmıştır. Bu izin verilebilir deformasyonlar N_f , 100,000 psi.lik etkili asfalt betonu modülünde değerlendirildiğinde, deformasyona yol açan tekrar sayısı ile eşitlenmiştir [5].



Şekil 4.14: Etkili Üstyapı Tasarım Sıcaklığı.

Mühendisler Kurulunun, CBR yöntemine bağlı tasarlanan birçok üstyapı bu yapıların çok tabakalı analizleri ve yaklaşık tabaka Elastisite modülleri ile Poisson oranları kullanılarak analiz edilmiştir; taban zemininin en tepesindeki düşey basınç deformasyonları da hesaplanmıştır. Bu gerilme değerleri, deformasyonlar için Mühendisler Kurulu eşitliğinden tahmini olarak belirlenen tekrar sayısı ile ilişkilidir. Konvansiyonel esnek üstyapıları analiz ederken, taban zemini modülünün $E_3=1500$ CBR' ye eşit olduğu varsayılır. Temel modülünün ise, taban zemini modüllerinin bir fonksiyonu olduğu ve sırasıyla CBR = 3,5,10 için 13.000, 17.250 ve 27.000 psi olduğu varsayılır. Temel ve taban zemini için, poisson oranının 0,40 (A.C) ve 0,45 oranları kullanılmıştır. Bu analiz sonuçları; düşey basınç gerilme deformasyonlarının genellikle uçak tipinden ve taban zemini dayanımından bağımsız olduğunu göstermektedir [5].



Şekil 4.15: Etkili Üstyapı Asfalt-Beton Modülü.

Sınırlı taban zemini deformasyonları, N_f ' nin fonksiyonu olarak Tablo 4.13' te gösterilmiştir. Bu değerlerin ve DC-8-63F standart uçak tipinin düşey basınç gerilmesi deformasyonlarının sonuçlarının kullanılması, Şekil 4.17' de gösterilen kalınlık tasarım eğrilerinin gelişimine izin vermiştir [5].

Tablo 4.13: Sınırlı Taban Zemini Gerilme Kriteri

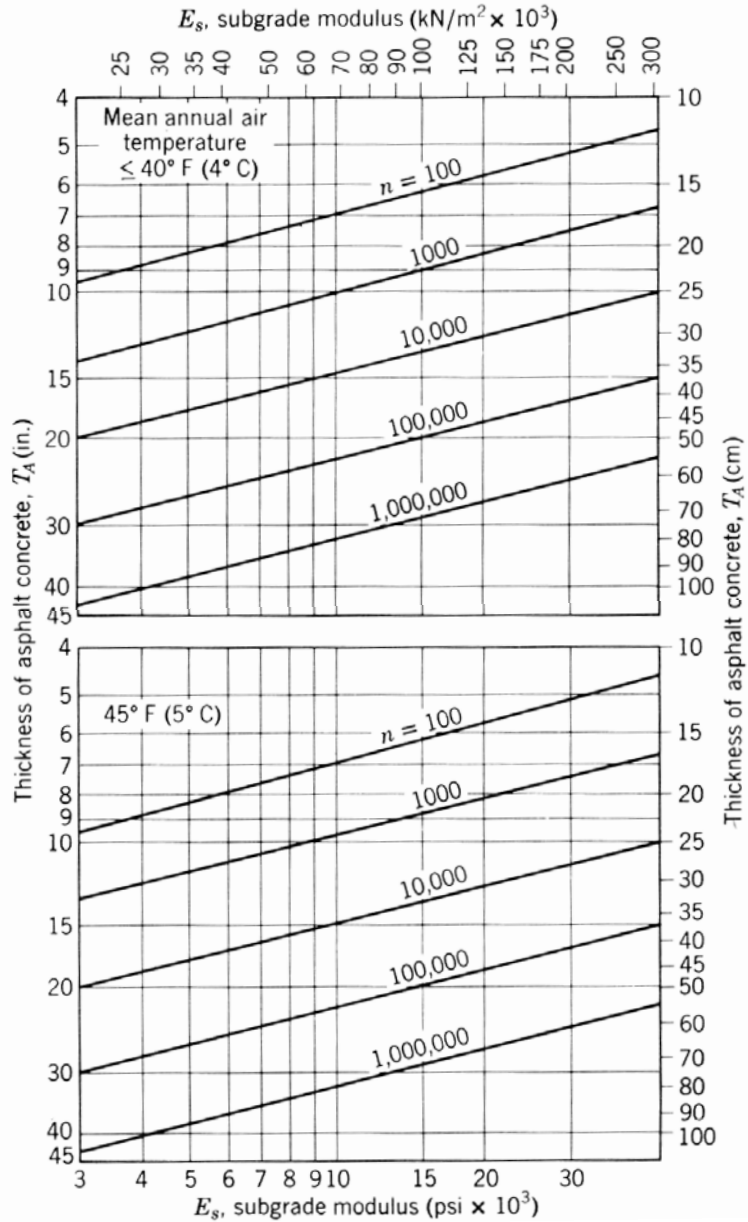
N_F	ϵ_c^a	E_1	ν_1	ν_2	MAAT ^b (°F)	T_F
100	2548	100.000psi	0,40	0,45	75	1,00
1000	1904				50	0,90
10.000	1646					
100.000	1508					
1.000.000	1422					

^a her inç için mikro inçlerdeki deformasyon

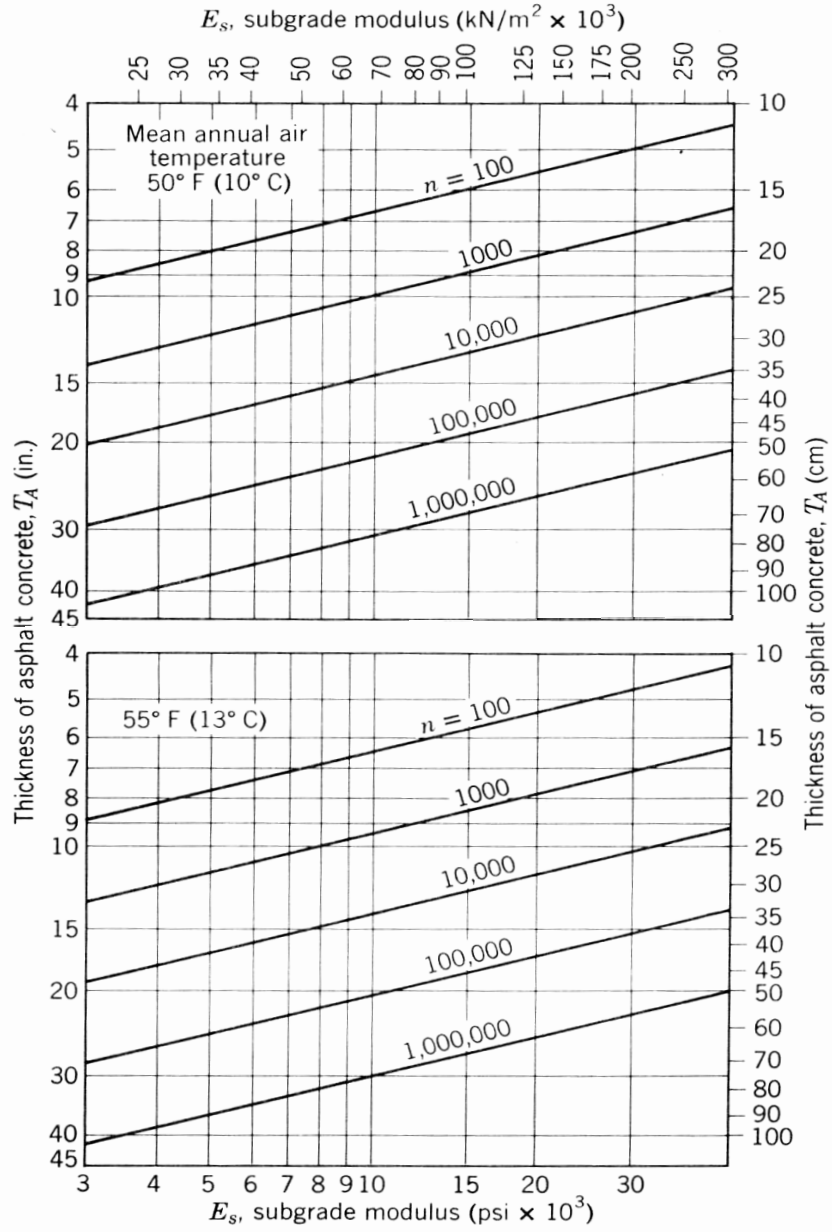
^b yıllık ortalama hava sıcaklığı

Tasarım Yöntemi

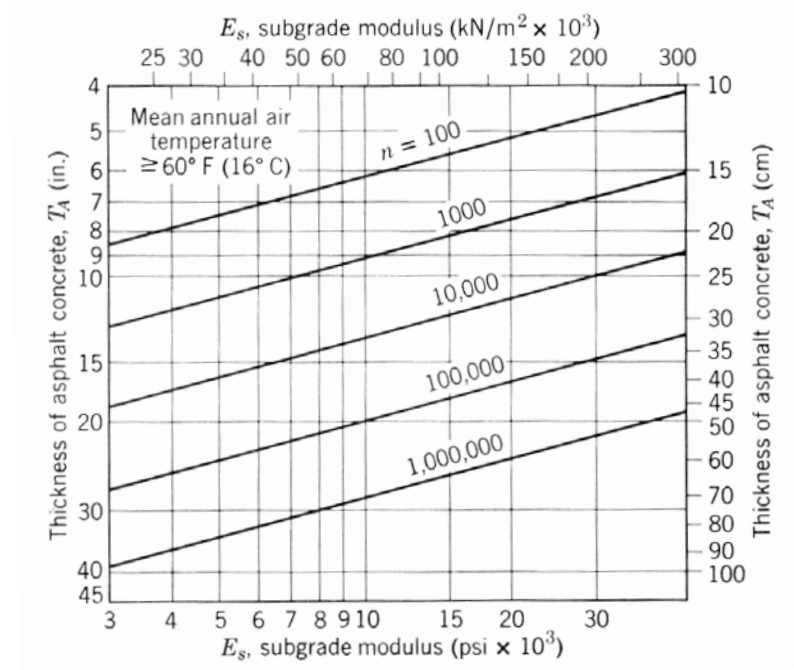
Tasarım yöntemi, her deformasyon durumu için seçilen iki ayrı kalınlığın analizine ve tasarım T_A değeri bu iki değer maksimumuna dayanmaktadır. Her deformasyon durumuyla beraber, izin verilir trafik analizi N_A ve tahmin edilebilir trafik analizi N_p olmak üzere iki analiz yapılmaktadır [18].



Şekil 4.16: T_A Tasarım Eğrisi – Yorulma Ölçütü (Asfalt Enstitüsü)



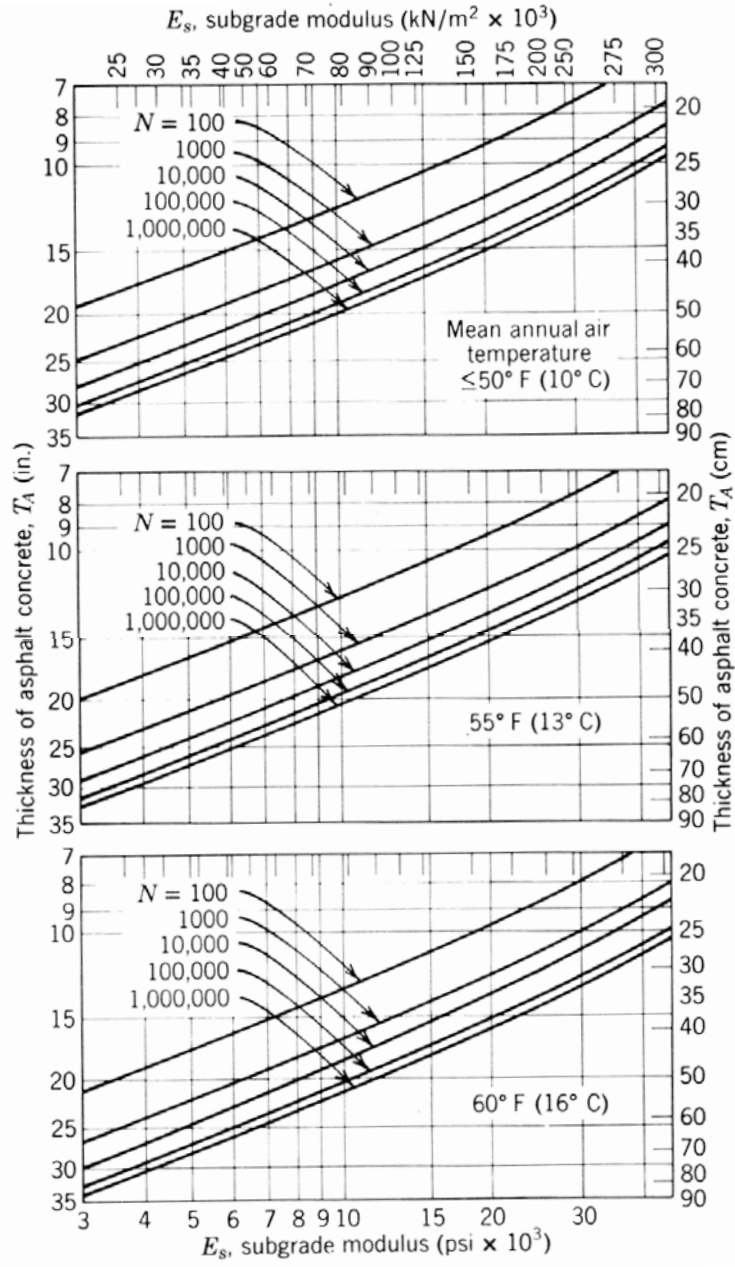
Şekil 4.16: T_A Tasarım Eğrisi – Yorulma Ölçütü (Asfalt Enstitüsü) devamı.



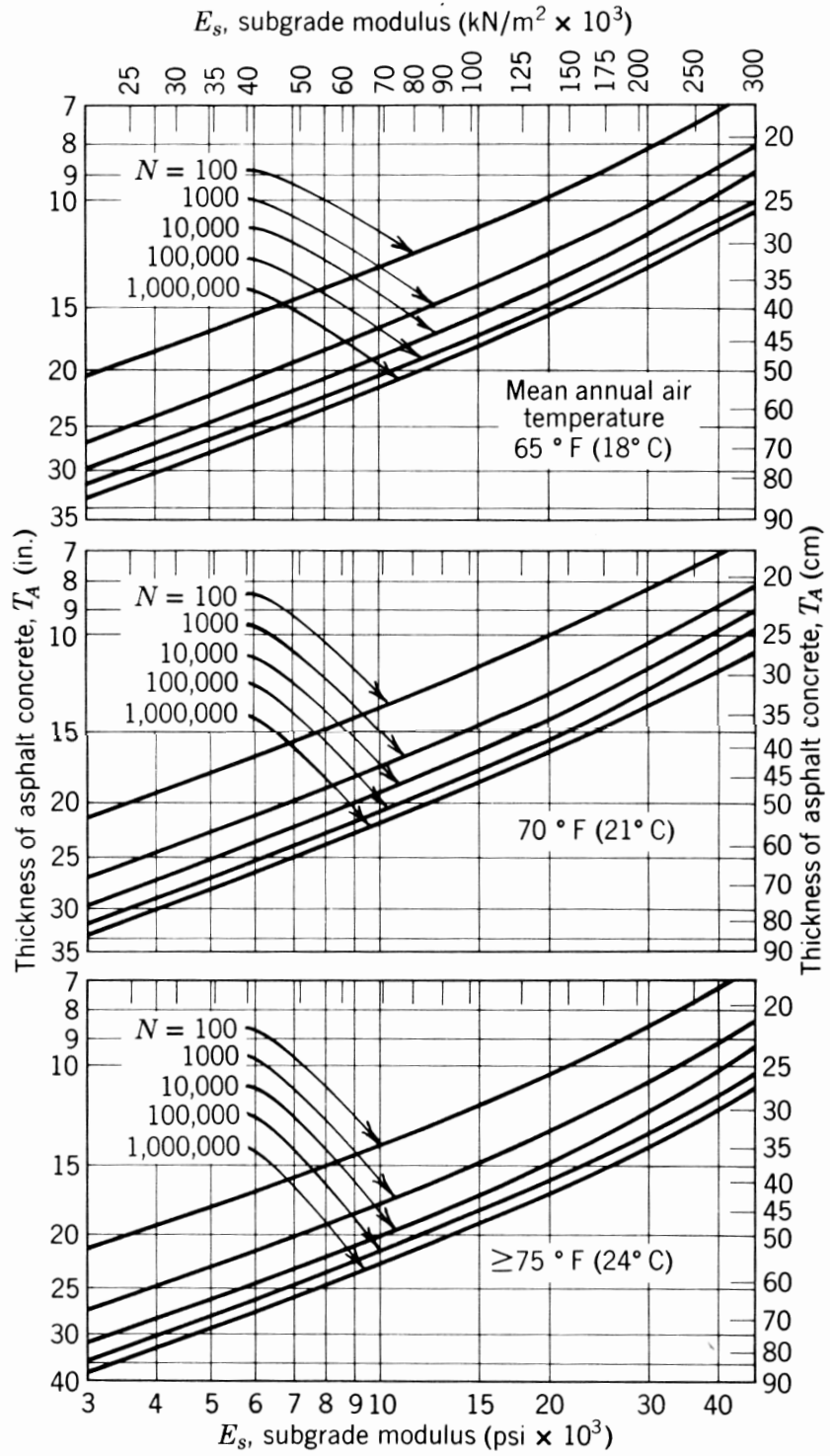
Şekil 4.16: T_A Tasarım Eğrisi – Yorulma Ölçütü (Asfalt Enstitüsü) devamı

N_A analizi, taban zemini tasarım modülünün ve çevrenin fonksiyonudur. Tasarım amacıyla taban zemin modülü dağılımının yüzde 85'lik kısmı kullanılmaktadır. Modül doğrudan doğruya, elastisite modülü deneylerinden elde edilebilmektedir. Tasarım modülü ve sıcaklığı bilerek, her deformasyon durumu için T_A 'nın N_a 'ya karşı hareketlerini belirlemek için şekil 4.16 ve 4.17 kullanılmaktadır [5].

N_p analizi, tahmin edilen karma trafik saptamasından çıkan eşdeğer DC-8-63F deformasyon tekrarlarının maksimum sayısını belirlemektedir. Analiz MS-11'de gösterilen denklik diyagramı ya da bilgisayar programı kullanılarak sonuçlandırılmıştır. F_{jh} değerlerinin üstyapı kalınlık fonksiyonu olmasından ötürü, N_p analiz sonuçları N_p 'nin T_A 'ya kıyaslanmasıdır. Verilen deformasyon durumu için kalınlık çözümü, N_a ve N_p alanlarının kesişim grafiğinden bulunmaktadır. Her deformasyon durumu için ayrı T_A elde edilmelidir. T_A tasarımı için iki kalınlıktan maksimum olan seçilmektedir [5].



Şekil 4.17: T_A Tasarım Eğrileri – Deformasyon Kriteri (Asfalt Enstitüsü)



Şekil 4.17: T_A Tasarım Eğrileri – Deformasyon Kriteri (Asfalt Enstitüsü) devamı

Asfalt Enstitüsü Yöntemi ile Tasarım Örneği

Problem, 30.000 B-727-200 ve 80.000 DC-9-41 kalkışına yer sağlamak için tam-derinlikli bir pistin tasarlanmasıdır [5]. Yıllık ortalama hava sıcaklığı 61°F ve tasarım CBR'ı = %7'dir [5].

Şekil 4.16 ve 4.17'yi kullanarak, $t = 61^\circ\text{F}$ ve $E = 1500 \times 7 = 10,500$ psi için, aşağıdaki N_a kalınlık değerleri bulunmuştur.

T_A (Deformasyon tipi ve yük tekrarına bağlı kalınlıklar)

N Değerleri					
	100	1000	10.000	100.000	1.000.000
Yorulma çatlaklığı	6,0 in.	9,1 in.	13,2 in.	19,2 in.	28,4 in.
Kalıcı Deformasyon	12,8 in.	16,2 in.	18,2 in.	19,4 in.	20,3 in.

Ek-4' te Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4 her uçak tipi ve deformasyon durumu için f_{ix} ve F_{ij} faktörlerinin özetini anlatmaktadır.

Yorulma Çatlakları

	Uçak	x=0-1 ft	x=4-5 ft	x=8-9 ft	x=12-13ft	x=16-17ft
f_{ix}	B-727-200	0,05	0,28	0,62	0,47	0,12
	DC-9-41	0,07	0,29	0,46	0,21	0,02

	Uçak	$T_A = 10$ in.	$T_A = 20$ in.	$T_A = 30$ in.
F_{ij}	B-727-200	0,645	0,303	0,172
	DC-9-41	0,264	0,076	0,037

Kalıcı Deformasyon

	Uçak	x=0-1 ft	x=4-5 ft	x=8-9 ft	x=12-13ft	x=16-17ft
f_{ix}	B-727-200	0,03	0,21	0,45	0,28	0,05
	DC-9-41	0,05	0,25	0,40	0,18	0,02

		$T_A = 10$ in.		$T_A = 20$ in.		$T_A = 30$ in.	
	Uçak	c	A_1	c	A_1	C	A_1
F_{ij}	B-727-200	0,446	-0,243	0,456	-0,426	0,153	-0,646
	DC-9-41	0,894	-0,626	0,899	-0,735	0,583	-0,844

B-727 için $p_{j1} = 30.000$ ve DC-9 için $p_{j2} = 80.000$ ve bilgi özetleri yukardadır, her uçak tipi için çizelge haline getirilmiş n_e değerleri, T_A , x aralığı ve deformasyon durumu sıradaki tablolarda gösterilmiştir.

Yorulma Çatlakları- Eşdeğer DC-8 Yük tekrarı

$$n_e = \sum_{j=1}^J p_i f_{jx} F_{jh}$$

T_A (in.)	Uçak	x=0-1 ft	x=4-5 ft	x=8-9 ft	x=12-13ft	X=16-17ft
10	B-727	968	5.418	11.997	9.095	2322
	DC-9	1478	6.125	9.175	4.435	422
	Toplam	2446	11.543	21.712 ^a	13.530	2744
20	B-727	455	2.545	5.636	4.272	1091
	DC-9	426	1.763	2.797	1.277	122
	Toplam	881	4.308	8.433 ^a	5.549	1213
30	B-727	258	1.445	3.199	2.425	619
	DC-9	207	858	1.362	622	59
	Toplam	465	2.303	4.561 ^a	3.047	678

^a N_p analizi için kullanılan maksimum değer.

Sonuçlar: $T_A = 10$ in. $N = 21,712$
 = 20 in = 8,433
 = 30 in = 4,561

Kalıcı Deformasyon- Eşdeğer DC-8 Yük tekrarı

$$n_e = \sum_{i=1}^J 10^c (p_i f_{jx})^{4_i+1}$$

T_A (in.)	Uçak	x=0-1 ft	x=4-5 ft	x=8-9 ft	x=12-13ft	x=16-17ft
10	B-727	481	2100	3739	2611	709
	DC-9	174	318	379	281	124
	Toplam	655	2418	4118 ^a	2892	833
20	B-727	142	433	671	511	190
	DC-9	71	408	123	99	56
	Toplam	213	541	794 ^a	610	246
30	B-727	16	31	41	35	19
	DC-9	14	18	19	17	12
	Toplam	30	49	60 ^a	52	31

^a N_p analizi için kullanılan maksimum değer

Sonuçlar: $T_A = 10$ in. $N = 21,712$
 = 20 in = 8,433
 = 30 in = 4,561

Bu değerlerin nasıl hesaplandığına dair bir örnek, $T_A = 10$ inç, $x = 8-9$ feet, ve B-27 uçakları için yorulma çatlağı analizleri referansına göre yapılabilir.

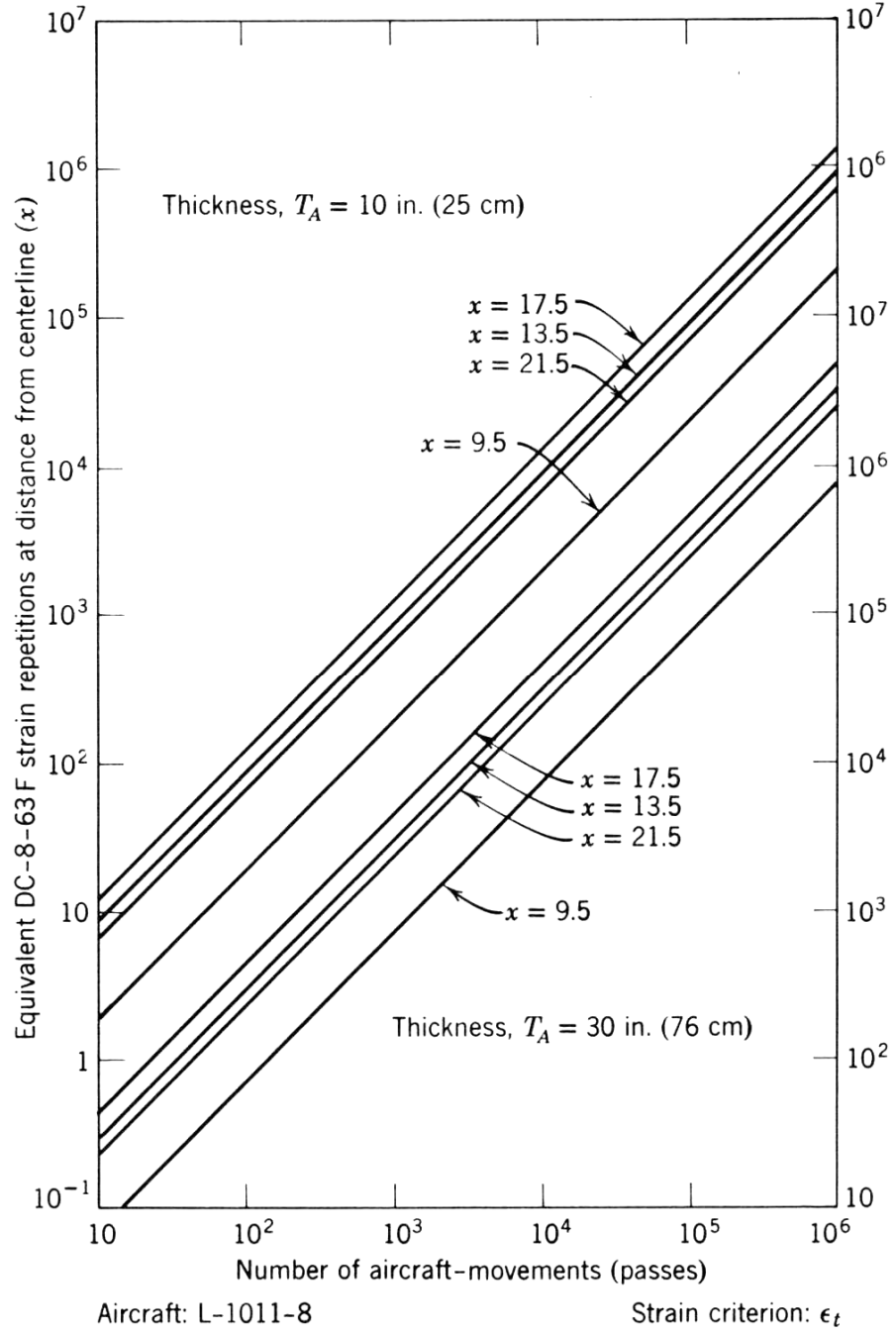
Böylelikle;

$$n_{ex} = p_i f_{jx} F_{jh} = (30000) (0.62) (0.645) = 11997 \text{ olmaktadır.}$$

Benzer olarak deformasyon analizi için DC-9, $x = 4-5$ feet ve $T_A = 30$ inç. Bu koşul için, $p_j = 80,000$, $f_{ix} = 0.25$, $c = 0,583$, ve $A_1 = -0,844$. Bu nedenle:

$$n_{ex} = 10^c (p_i \cdot f_{jx})^{A_1+1} = 10^{0.583} [(80000)(0.25)]^{0.156} = 18 \text{ olmaktadır.}$$

Çizelge haline getirilen değerler, her uçak, gerilme tipi ve T_A için, pistten merkeze çeşitli yanal uzaklıklarda denk DC-8-63F yük tekrarlarını göstermektedir. Bu değerler, her aralıkta, eşdeğer tekrarların toplamı karma trafik etkilerinin toplamını ifade etmektedir. Bununla beraber, verilen bir kalınlık T_A için, tasarımda maksimum kalınlık hedeflenmektedir. Bu maksimum değerin meydana geldiği konum olası maksimum hasar konumu için belirleyicidir. Her tehlike durumu için tahmin edilebilir trafik değerleri, çizelge haline getirilmiş eşdeğer DC-8- tekrar analizinin altında özetlenmiştir. Bu sonuçları ve önceki izin verilebilir trafik değerlerini kullanarak, tasarım gereklilikleri yorulma çatlamasını engellemek adına $T_A = 14$ inç (35.5 cm) ve deformasyona karşı $T_A = 16.6$ inç. (42.16 cm)tir. Böylelikle, pist kalınlığı (kritik alan) tam derinlikli üstyapı için 17 inç (43.18 cm) olmaktadır.



Şekil 4.18: Tipik Uçak Eşdeğerlik Grafiği. (Asfalt Enstitüsü);
 $T_A = 10$ inç.ve $T_A = 30$ inç

4.4 ACN/PCN Yöntemi

1981 yılında ICAO, uçak yük oranlarını ve üstyapının kuvvet dayanımını sınıflandırabilmek için Uçak sınıflandırma Numaraları/ Üstyapı Sınıflandırma Numaraları (ACN/PCN) yöntemini önermiştir [17]. ICAO Ek' 14'ün 2.5.2 maddesinde, ağırlığı 5700 kg dan daha büyük olan uçaklar için tasarlanan bir üstyapının taşıma kapasitesinin, uçak sınıflandırma numarası-üstyapı sınıflandırma numarası (ACN-PCN) yöntemini kullanarak elde edilmesi gerektiğini belirtmektedir [18]. ICAO bu yöntemin daha kullanılabilir ve anlaşılır olması için;

a) Yöntemin esası,

b) Bir uçağın ACN' sının nasıl belirlendiği açıklanmıştır [19].

4.4.1 ACN-PCN Yönteminin Esası

ACN, Esnek ya da rijit üstyapılar üzerinde belirli bir taban zemini kuvveti için uçağın rölatif etkisini ifade eden sayı,

PCN, Bir üstyapının en yakın yük taşıma kapasitesini ifade eden sayıdır [20].

İlk başta, ACN-PCN yöntemi, sadece üstyapı dayanıklılığı verilerinin Havacılık Bilgileri yayınında yayınlanması için belirlenmiştir. Bu yöntem, üstyapıların tasarımı ya da değerlendirilmesi için kullanılmaz. Aslında ACN-PCN yöntemi devletlerin kendi seçecekleri herhangi bir tasarım yöntemini kullanmalarına izin vermektedir. Bu noktada yöntem, üstyapının değerlendirilmesinden uçakların yük oranının değerlendirilmesine (ACN) doğru kaydırılmıştır ve uçakların yük oranının değerlendirmesini sağlayan işlemi içermektedir. Bir üstyapının dayanıklılığı, üstyapının sınırsız olarak kaldırabileceği bir uçak yükü oranını dikkate alan bir yöntemle belirlenmektedir [19].

Teknik değerlendirme mevcut değilse, uçaklarla edinilen tecrübeler ve aşağıda belirtilen işlemlerden birini kullanılarak, en kritik uçağın ACN' si hesaplanır. Bu sayı bir PCN' ye dönüştürülür ve AIP (Aeronautical Information Publications)' de bu değeri kendi havaalanının yük oranı olarak yayımlar. Bu şekilde raporlanan PCN,

bu sayıya eşit ya da daha küçük ACN' si olan bir uçağın, lastik basıncında herhangi bir sınırlamaya maruz kalmaksızın bu üstyapı üzerinde iniş kalkış yapabileceğini göstermektedir [19].

Uçak üreticilerine, yöntemin kullanılmasını mümkün hale getirmek için, ürettikleri uçağın detaylı özellikleri içinde, hem esnek üstyapılar, hemde rijit üstyapılar için standart dört ayrı zemin altı dayanıklılık kategorisine göre maksimum apron ağırlığı ve çalışma sırasındaki boş ağırlığı temsil eden iki farklı ağırlık için hesaplanmış ve Aedrome Design Manual Doc-9157-AN/90 Ek-5'te birçok uçağın ACN' sini gösteren bir tablo verilmiştir. ACN hesaplanırken kullanılan ağırlığın "statik" bir ağırlık olduğunu ve dinamik unsurların eklenmesi suretiyle yüklemde bir artışa izin verilmediğini de belirtmek gerekmektedir [19].

ACN-PCN yöntemi aynı zamanda her bir üstyapı türüne göre aşağıdaki bilgilerin raporlanması konusunda bilgi vermektedir. Bunlar,

- a) Üstyapı türü
- b) Zemin kategorisi
- c) İzin verilebilecek maksimum lastik basıncı ve
- d) Kullanılan üstyapı değerlendirme yöntemidir.

Sonuç olarak, normalde karşılaşılan zemin altı dayanıklılığı lastik basınçları aşağıda gösterildiği şekilde kategoriler halinde gruplandırılmıştır [19].

4.4.2 ACN' lerin Belirlenmesi

Akış Şeması

Aedrome Design Manual Doc-9157-AN/90' da Şekil 4.1'de verilen akış şeması uçakların ACN' lerinin ACN/PCN yöntemine göre nasıl hesaplanabileceğini kısaca açıklamıştır.

Çeşitli Terimlerin Tanımlanması ve ACN-PCN Yöntemi'nde Kullanılan Standart Değerler

a) Taban zemini kategorisi: ACN-PCN yönteminde, sürekli bir zemin altı dayanıklılık cetveli yerine, daha çok sekiz standart değer (yani dört rijit kaplama k değeri ile dört esnek kaplama CBR değeri) kullanılmaktadır.

Taban zemini dayanımı kategorisi;

Yüksek dayanıklılık; $k = 150 \text{ MN/ m}^3$ şeklinde kategorize edilir ve 120MN/m^3 üzerinde olan bütün k değerleri rijit üstyapıyı temsil ederken, CBR 15 ile karakterize edilir ve 13 üzerindeki CBR değerleri esnek üstyapıyı temsil etmektedir.

Orta dayanıklılık; $k = 80 \text{ MN/ m}^3$ şeklinde karakterize edilir ve 60 ila 120 MN/m^3 arasında olan bütün k değerleri rijit üstyapıyı temsil ederken, CBR 10 ile karakterize edilir ve 8 ile 13 arasında CBR değerleri esnek üstyapıyı temsil etmektedir.

Düşük dayanıklılık; $k = 40 \text{ MN/m}^3$ şeklinde karakterize edilir ve 25 MN/m^3 ila 60 MN/ m^3 arasında olan bütün k değerleri rijit üstyapıyı temsil ederken, CBR 6 ila karakterize edilir ve 4 ile 8 arasında CBR değerleri esnek üstyapıyı temsil etmektedir.

Aşırı düşük dayanıklılık; $k= 20 \text{ MN/m}^3$ şeklinde karakterize edilir ve tüm 25 MN/m^3 altında olan bütün k değerleri rijit üstyapıyı temsil ederken CBR = 3 ile karakterize edilir ve 4 altındaki CBR değerleri esnek kaplamaları temsil etmektedir..

b) Rijit kaplamaların beton eğilme gerilmesi: Rijit üstyapı için raporlama amaçlı olarak, sadece tek tip bir raporlama sağlamak için, standart bir gerilme tespit edilir ($\sigma = 2,75 \text{ MPa}$)

c) Lastik basıncı: Yüksek, orta, düşük ve çok düşük şeklinde dört grupta kategorize edilebileceğini, bunlara da aşağıdaki sayısal değerlerin verilebileceğini teyit etmektedir.

Yüksek: basınç limiti yok

Orta- Basın. Limiti 1,50 MPa (15,3 kg/cm²)

Düşük- basınç limiti 1,00 MPa (10,2 kg/cm²)

Çok düşük – basınç limiti 0,50 MPa (5,1 kg/cm²)

d) Matematiksel Olarak Türetilen Tek Tekerlek Yükü: Bir uçağın iniş takımları için kullanılan matematiksel model aracılığıyla verilen kalınlık ile 1,25 MPa standart lastik basıncında tek bir tekerleğin kalınlığının eşitliğini kurarak yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen tek tekerlek yükü daha sonra kalınlığa daha fazla atıfta bulunmaksızın kullanılmaktadır. Bu, kalınlığın eşit olmasına bağlı olarak, “ üstyapı üzerinde aynı gerilmeyi uygulayacağı” düşünülerek, kalınlığın büyüklüğünden çok, eşit kalınlıklara gereken önemin verilmesi nedeniyledir.

e) Uçak Sınıflandırma Numarası (ACN): Bir uçağın ACN’ si sayısal olarak türetilen tek tekerlek yükünün iki katı şeklinde tanımlanmakta ve bin kilogramın katları olarak ifade edilmektedir. Tek tekerleğin lastik basıncı 1,25 MPa olarak standartlaştırılmıştır. Ayrıca, tek tekerlek yükünün türevi taban zemini taşıma kapasitesinin bir fonksiyonudur. Uçak sınıflandırma numarası (ACN) sadece dört zemin kategorisi için (yani yüksek, orta, düşük ve çok düşük dayanıklılık) tanımlanmaktadır.

Kısaltmalar

a) Uçak parametreleri

MRGM- Maksimum rampa brüt kütlesi, kilogram olarak.

b) Kaplama ve zemin parametreleri

σ - raporlama için standart eğilme gerilmesi 2,75 MPA

t – kaplama kalınlığı, santimetre olarak

Rijit üstyapı kalınlığı, veya Esnek üstyapılar için üstyapının yapısal sisteminin tabaka kalınlığıdır (yüzeyden zemin altına).

k- zemin altı reaksiyonu için Westergaard modülü, MN/m³

l- Westergaard bağıl sertlik yarıçapı, santimetre olarak

$$l = \sqrt{\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (4.9)$$

E, elastisite modülü

μ : Poisson oranı ($\mu = 0,15$)

Lastik basınçları

P_s- Tek tekerlek yükü için lastik basıncı; 1,25 MPa

P_q– Maksimum rampa ağırlığı şartlarındaki uçak için lastik basıncı

Matematiksel Modeller

ACN-PCN Yönteminde, rijit üstyapılar için, Westergaard çözümü ve esnek üstyapılar için, Boussinesq çözümü olmak üzere iki matematiksel yöntem bulunmaktadır. Geniş bir alanda kullanılan bu iki model , dünyanın her yerindeki üstyapı tasarımı yöntemlerine minimum üstyapı parametresi değerleriyle (yani sadece yaklaşık taban zemini k veya CBR değerleri gereklidir.) maksimum korelasyon sağlamaktadır.

Bilgisayar Programları

Bu matematiksel modelleri kullanarak iki bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu programlar, Ek-14/3'de verilmiştir. Rijit üstyapılar üzerinde, Portland Çimentolar Birliği, İllionis, ABD' den Mr. R. G. Packard'ın geliştirdiği programı, esnek üstyapılar üzerinde , ABD Kara Kuvvetleri Su Yolları Deney İstasyonu Talimatnamesi -77-1 No'lu ve “ CBR tasarım eğrilerinin geliştirilmesi işlemleri” başlıklı raporunu baz almıştır. Ek-14 B Bölümünde bulunan tabloların halen kullanılmakta olan uçaklar için bu programların kullanımına hiç ihtiyaç göstermediği de bu arada belirtilebilir.

Grafik Yöntemleri

Rijit üstyapılar için dönüşüm eğrileri ve uçak üreticileri tarafından yayınlanan gerekli üstyapı kalınlığı tabloları kullanılmaktadır.

Rijit üstyapı için bir uçağın ACN' sinin belirlenmesi; üretici tarafından yayınlanan üstyapı ihtiyacı tablosu kullanılarak uçağın ağırlığı için referans kalınlık, zemin k değeri ve standart eğilme gerilmesi 2,75 MPa elde edilir. Bu referans kalınlık ve seçilen zemin için tek tekerlek yükü bulunmaktadır. ACN , seçilen ağırlık ve zemin k değeri için, 1000 kg olarak tek tekerlek yükünün iki katıdır. ACN doğrudan tablodan da okunabilmektedir.Esnek üstyapılar için yine dönüşüm eğrileri ve U.S.A Askeri Mühendisler CBR yöntemine göre uçak üreticileri tarafından yayınlanan gerekli kalınlık tablolarını kullanılmaktadır. Birinci eğri aşağıdaki eşitlikten yola çıkarak geliştirilmiştir.

$$t = \sqrt{\left(\frac{DSWL}{C_1 CBR} - \frac{DSWL}{C_2 P_s} \right)} \quad (4.10)$$

Burada;

T= referans kalınlık, cm.

DSWL= 1,25 MPa lastik basıncında tek teker yükü.

$P_s = 1,25$ MPa.

CBR = standart zemin için eğride 3,6,10,15 değerleri kullanılmıştır.

$C_1 = 0,5695$

$C_2 = 32,035$

Bir uçağın ACN' sinin belirlenmesi için üretici tarafından yayınlanan üstyapı ihtiyacı tablosu kullanılarak uçağın ağırlığı için referans kalınlık, zemin k değeri ve standart eğilme gerilmesi 2,75 MPa elde edilir. Bu referans kalınlık ve Şekil 1.4 kullanılarak seçilen zemin için tek tekerlek yükü bulunmaktadır. ACN , seçilen ağırlık ve zemin k değeri için, 1000 kg olarak tek tekerlek yükünün iki katıdır. ACN doğrudan tablodan da okunabilmektedir.

5. RİJİT HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIMI

Birçok rijit havaalanı üstyapı tasarım yöntemi, üstyapıda oluşan gerilmeler esas alınarak geliştirilmiştir. Rijit havaalanı üstyapısında oluşan gerilmelerin büyüklüğü; yük tekrar sayısına, tekerlek düzenine, toplam yüke, lastiklerin basıncına ve tasarım alanına (örneğin: uçak pisti, taksi yolu vb.) bağlı olmaktadır. Ayrıca, üstyapı üzerindeki gerilmelerin miktarı, taban zemini reaksiyon modülüne, betonun elastisite modülüne ve betonun Poisson oranına göre de farklılık göstermektedir [5].

Rijit havaalanı üstyapı tasarımı, karayolu üstyapı tasarımından farklılık göstermektedir. Havaalanlarında tekrarlı yük sayısı çok daha az ancak, bunun yanında havaalanı üstyapısı üzerindeki brüt yük karayolundan daha fazladır. Pompaj olayı da karayollarında ciddi bir sorun olabilecek iken, havaalanlarının üstyapısı açısından daha az önem taşımaktadır. Ayrıca; büyük oranda bir yük, rijit havaalanı üstyapısının bir kenarının oldukça uzağında uygulanmakta ve yükler özellikle hava alanının merkezinde olmaktadır.

Rijit havaalanı üstyapı tasarımı, esnek havaalanı üstyapı tasarımından çok farklı olmayan birçok basit adımı içermektedir. İlk olarak; zemin durumuyla ilgili bir inceleme yapılmakta ve taban reaksiyon modülü tayin edilmektedir. İkinci olarak; tekerlek yükleri ve betonun kopma modülü belirlenmektedir.

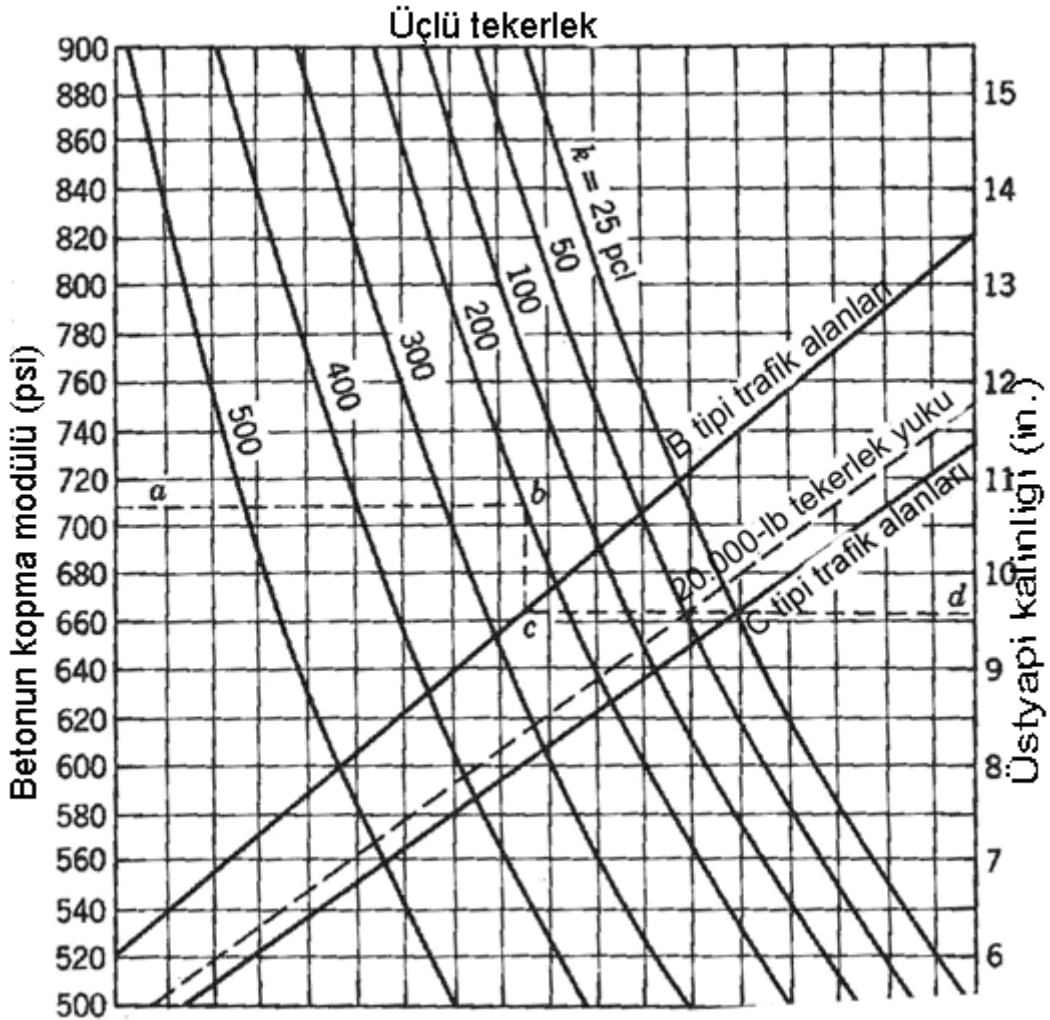
Rijit havaalanı üstyapılarının tasarımında, karayolu üstyapı tasarımına benzer olarak zeminin taşıma gücü, zemin reaksiyon modülü (efektif yatak katsayısı) ile tanımlanmaktadır. Zemin reaksiyon modülü, plaka yükleme deneyi ile tayin edilmektedir. Bu deneyde, 30 inç çapında standart plakaya yük uygulanmaktadır. Plakta oluşan deformasyon, gösterge sapması vasıtasıyla okunmakta ve uygulanan basıncın plakta oluşan defleksiyon miktarına oranı ile reaksiyon modülü saptanmaktadır.

Bu bölüm kapsamında, rijit havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerinden Mühendisler Kurulu ve FAA tarafından geliştirilen ampirik yöntemler ile PCA tarafından geliştirilen analitik tasarıma yer verilmiştir.

5.1 Ampirik Yöntemler

5.1.1 Mühendisler Kurulu Yöntemi

Mühendisler Kurulu tarafından üstyapı kalınlığının hesabı için, trafik alanları (Şekil 4.3' de gösterilmiştir), betonun kopma modülü ve zemin reaksiyon modülüne bağlı olarak tasarım eğrileri geliştirilmiştir. Tasarım eğrileri hafif, orta ve ağır yük taşıyan havaalanları için verilmiştir. Bu eğriler, Şekil 5.1' den 5.3' e kadar gösterilmiştir.

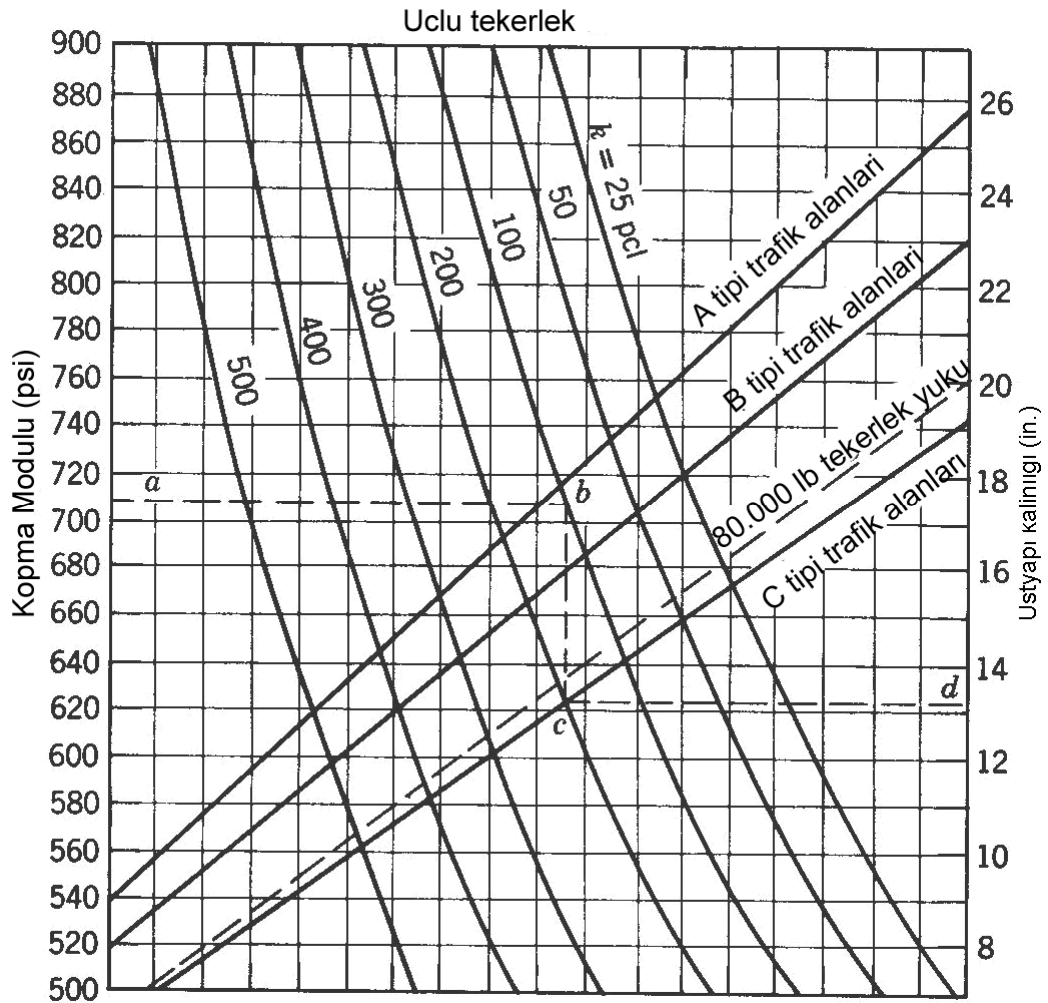


Şekil 5.1: Hafif Yük İçin Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri (Mühendisler Kurulu)

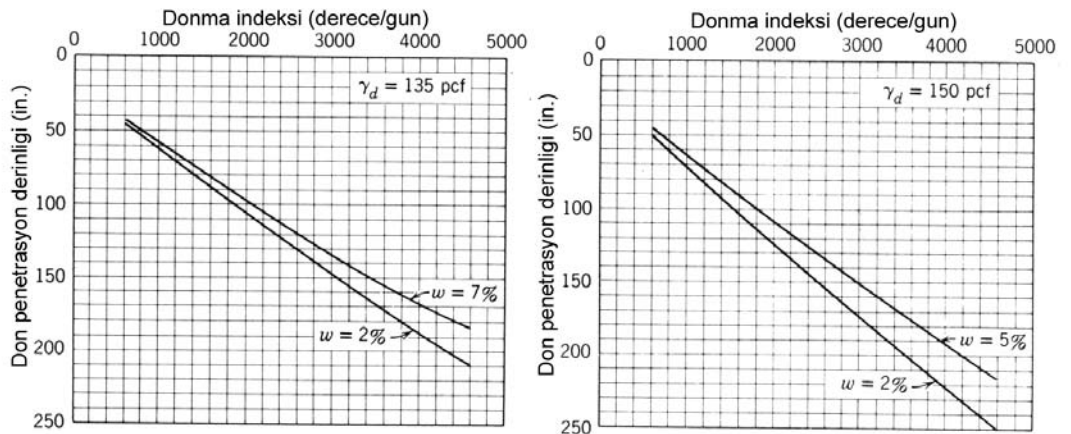
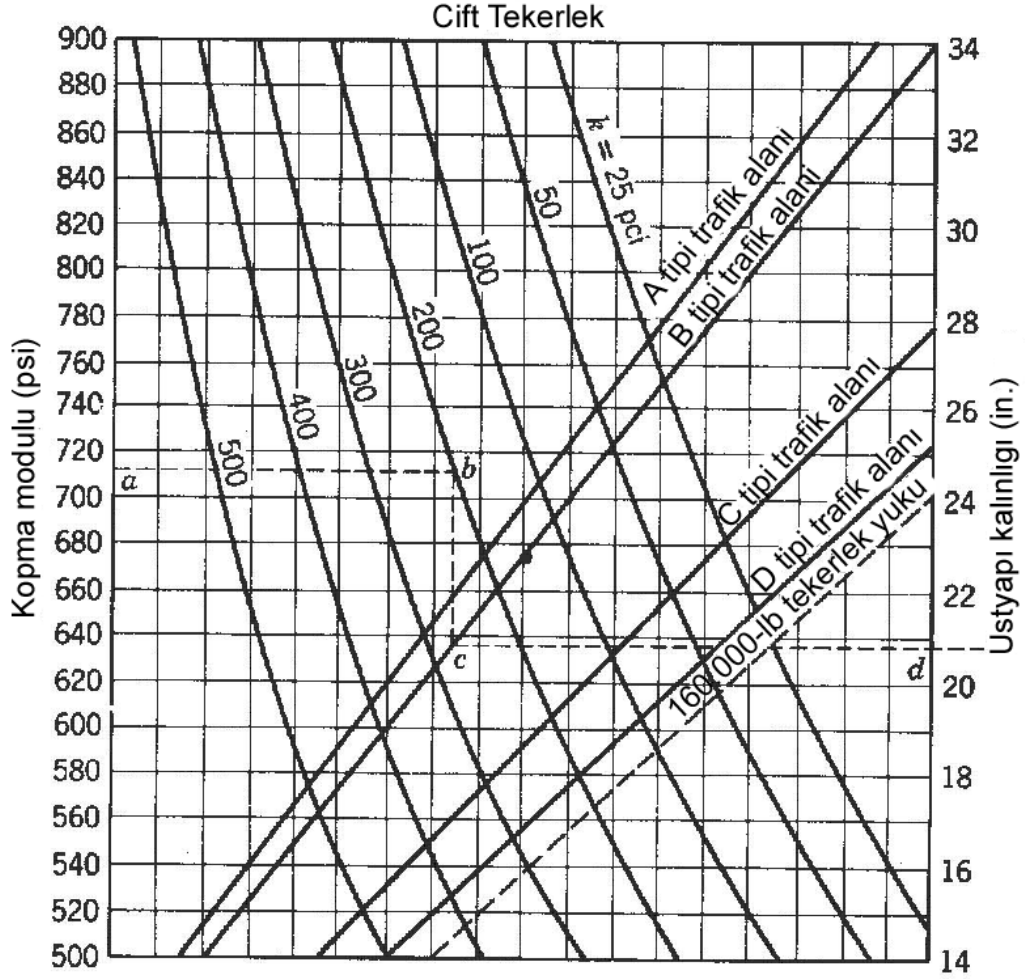
Donma Olayı

Esnek üstyapılarda olduğu gibi, sınırlı don girişi ya da donma erime sürecindeki dayanım kaybı (dayanımın azalması) şeklinde iki durumdan biri tasarımı kontrol etmektedir. Sınırlı don girişi durumu, tüm F4 taban zeminlerinde ve diğer tüm dayanıksız zeminlerde gereklidir. Sınırlı don girişi durumu tasarımında, beton plak tabakası altında minimum 4 inç (10.16 cm) donmaya dayanıklı filtre temel tabakası yapılmalıdır [5].

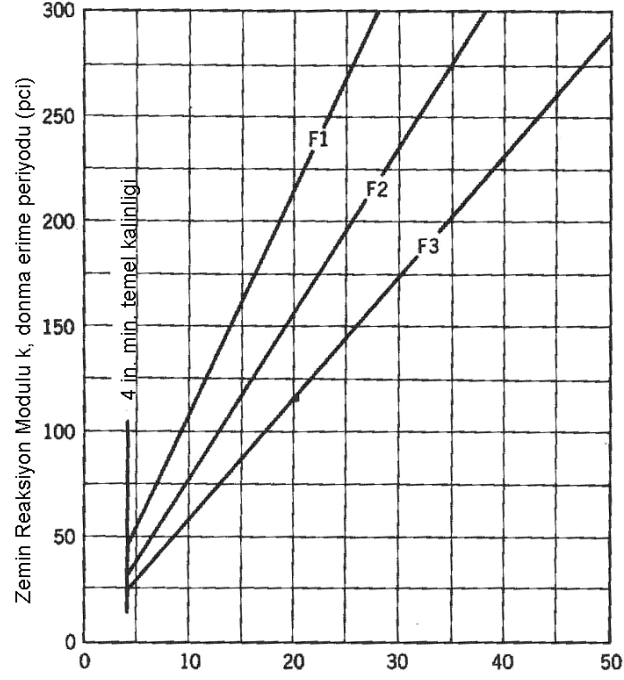
Sınırlı don girişi için Şekil 5.4' den donma indeksine bağlı don girişi değeri bulunmakta ve Şekil 5.5' den bu değer için gerekli temel kalınlığı belirlenmektedir.



Şekil 5.2: Orta Ağırlıkta Yük için Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri



tabakasının kalınlığı 4 inç'e düşürülebilmekte ve geri kalan temel tabakası bir filtre gibi tasarlanabilmektedir [5].



Şekil 5.6: İndirgenmiş-Dayanım için Taban Zemini Reaksiyon Modülü Eğrileri

Mühendisler Kurulu Yöntemi ile Tasarım Örneği

Problem, üçlü çift-tekerleklerin (tricycle dual-wheel) 100.000 poundluk yükü için B tipi trafik alanında beton üstyapı tasarlanmasıdır. Tasarım verileri aşağıda verilmiştir [5].

Tablo 5.1: Tasarım Örneği

Donma İndeksi	Tip	Plak Kalınlığı (in.)	Temel Kalınlığı (in.)	Şekil
1700	Normal tasarım,	$14^{3/4}$ (15)	-	Şekil 5.2
	Dayanımın azalması	17 (k=90)	17	Şekil 5.2 ve 5.6
	Sınırlı don girişi	15 ^a	50	Şekil 5.2 ve 5.5
500	Normal tasarım	$14^{3/4}$ (15)	-	Şekil 5.2
	Dayanımın azalması	19 (k=25, 4 inç temel için)	4	Şekil 5.2 ve 5.6
	Sınırlı don girişi	15 ^a	16	Şekil 5.2 ve 5.5

^a Normal tasarımda olduğu gibi kaplama kalınlığını kullanılmaktadır.

Kopma modülü 700 psi, taban verimsiz kil zemin (F3), taban zemini reaksiyon modülü (k) 200 psi, su seviyesinin mesafesi 5 feet (152,4 cm) ve donma indeksi 1700'dür. Zemin nem içeriği % 15, zemin yoğunluğu 135 pcf (lb/ft³) ve temel nem içeriği % 5'tir. Kalınlığa ait tasarımlar Tablo 5.1' de belirtilmiştir. Normal tasarımda (donma olmadan) beton plak 15 inç (38.1 cm) olmakla beraber, dayanımın azalması durumu için 17 inç (43.2cm) lik beton plak ve 17 inçlik temel gereklidir. Sınırlı don girişi için temel kalınlığı ve beton plak kalınlığı 65 inç (165 cm) tir. Tablo 5.1 ayrıca, donma indeksi 500 için tasarım değerlerini göstermektedir. Bu durum için, k tasarım değeri, temel tabakası minimum 4 inç (10.16 cm) için 25 pci'ye eşittir ve üstyapı kalınlığı 19 inç (48.26 cm) beton plak ve 4 inç filtre temel tabakasıdır.

5.1.2 Federal Havacılık Yönetimi (FAA) Yöntemi

Federal Havacılık Yönetimi'nin esası, Portland Çimento Birliği bilgisayar programı tarafından hazırlanan gerilme grafiklerine dayanmaktadır [29].

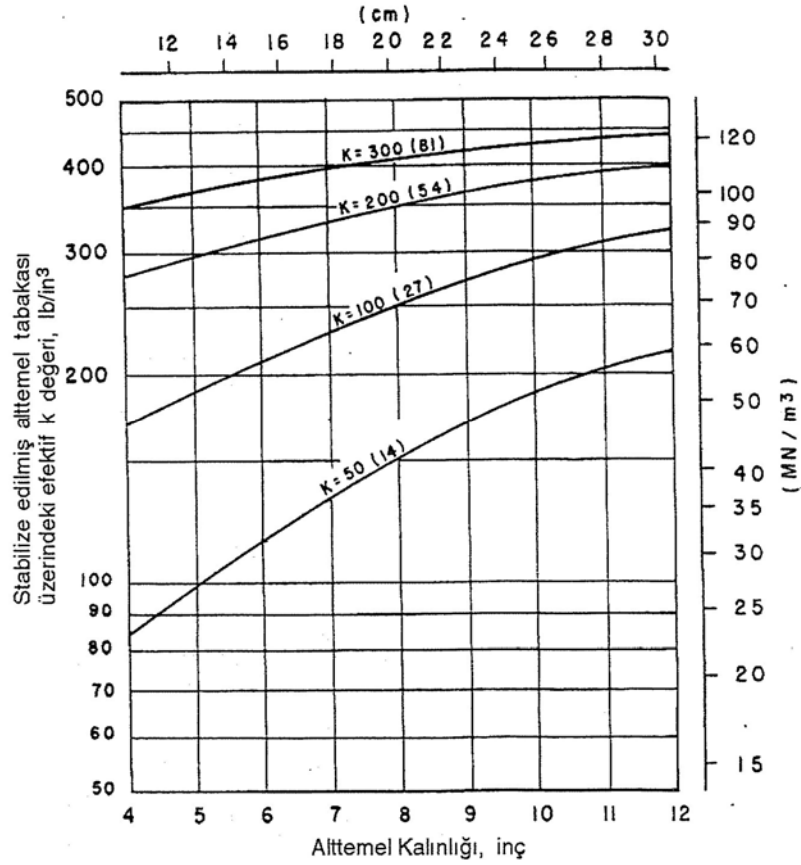
Tasarımda, 20 yıllık üstyapı ömrü esas alınmaktadır. Şekil 5.7' den 5.9' a kadar FAA tarafından geliştirilen tasarım grafikleri verilmiştir. Genel tasarım prensibi, esnek üstyapı tasarımında olduğu gibi, üstyapı malzeme özelliklerini (taban zemini ve üstyapı tabakaları), kritik uçak yükü etkilerini (uçak ağırlığı ve tekerlek düzeni), trafik hacmini (yıllık uçak kalkış sayısı) ve donma koşullarını değerlendiren bilgileri içermektedir. Burada farklı olarak malzeme özellikleri, zemin için, zemin reaksiyon modülü ve kaplama tabakası (beton plak) için betonun kopma modülü veya eğilme mukavemeti ile ifade edilmektedir [23].

Yöntemdeki trafik analizleri, tasarımda kullanılan tasarım uçağı eşdeğer kalkışları esnek üstyapı tasarımı ile aynı özellikleri taşımaktadır. Tasarım uçağının belirlenmesi 4. Bölüm'de anlatılmıştır. Burada, Tablo 5.2' de kritik uçakların eşdeğer kalkışlarını saptamak için bir ölçüm modeli özetlenmiştir. Tablo 5.2' de a, dingil tipine göre uygulanan yük tekrarlarının faktörünü gösterir. Tabloda yer alan (b) ve (c) bölümleri tüm uçakların kalkış sayısı, tasarım uçağı kalkış sayısı eşdeğerine dönüştürülmüştür. Sonuçta tasarım için, tasarım uçağının ağırlığı ve toplam eşdeğer kalkış sayısı esas alınmaktadır [23].

Kopma modülüne uygulanan güvenlik faktörleri Tablo 5.3' de verilmiştir. Bu güvenlik faktörleri doğrudan kopma modülüne uygulanmaktadır.

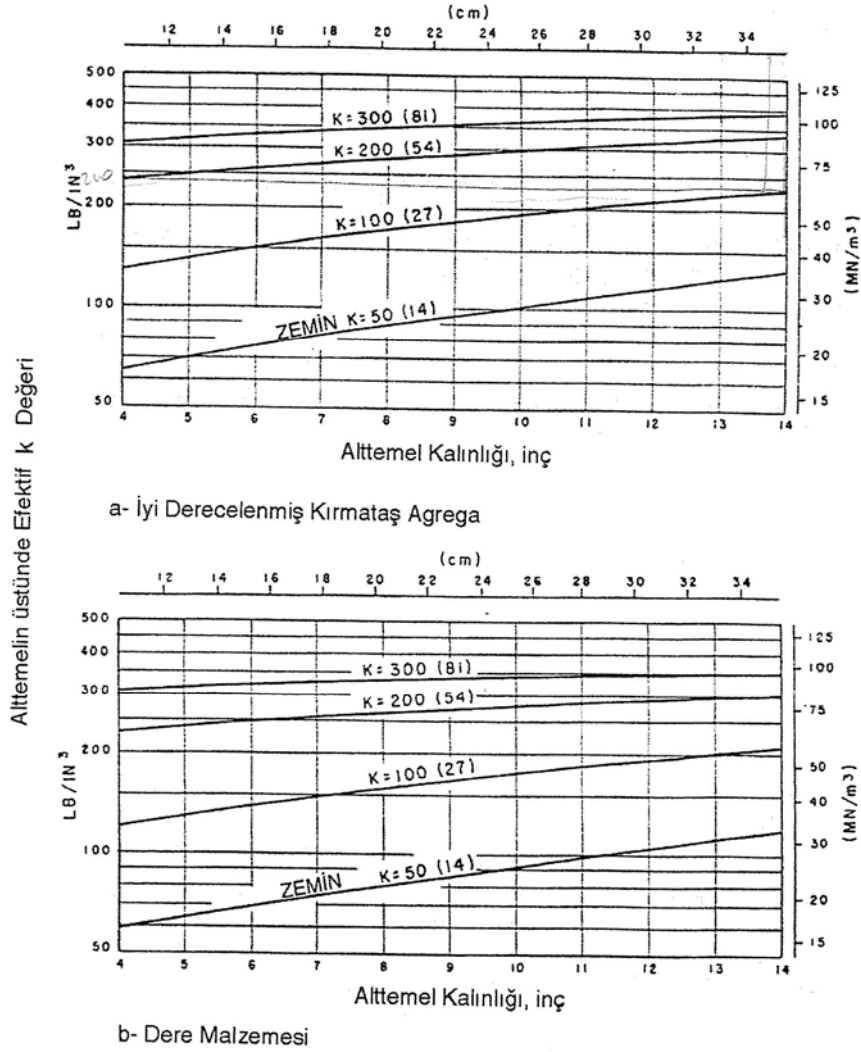
Temel ve Alt temel Tabakası

FAA, ağır yükler için, beton plak altında stabilize temel öngörmektedir. Bu stabilize temeller, eğer kritik uçaklar çift tandemli ise ve yükleri 200,000 pounddan fazla ise kullanılmaktadır. Daha hafif yükler için, granüler temeller kullanılmakta, fakat bunların iyi sınıf malzeme olması gerekmektedir [5]. Temel tabakası olarak; bitümlü temel, agregalı temel, kırmataş temel, doğal çimentolu temel ve beton katkıli temel kullanılabilir.



Şekil 5.7: Stabilize Edilmiş Temel Tabakasının Taban Zemini Reaksiyon Modülüne Etkisi

Stabilize temellerin taban zemini reaksiyon modülünde meydana getireceği olası artış Şekil 5.7, alt temel tabakası kalınlığının taban zemini reaksiyon modülünde meydana getireceği artış Şekil 5.8' deki abaktan saptanmaktadır [12].

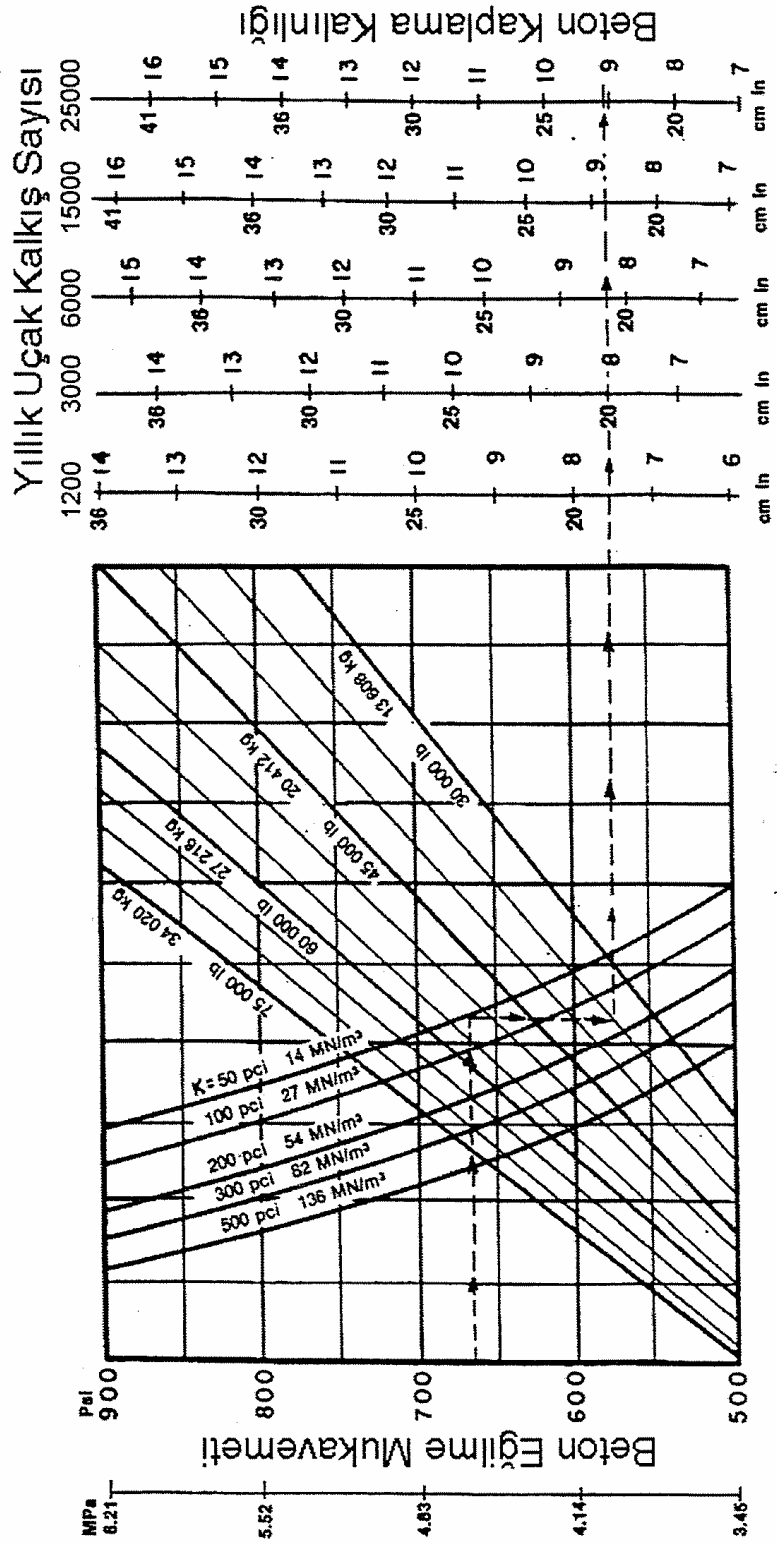


Şekil 5.8: Alt temel Kalınlığının, Taban Reaksiyon Modülü Üzerindeki Etkisi

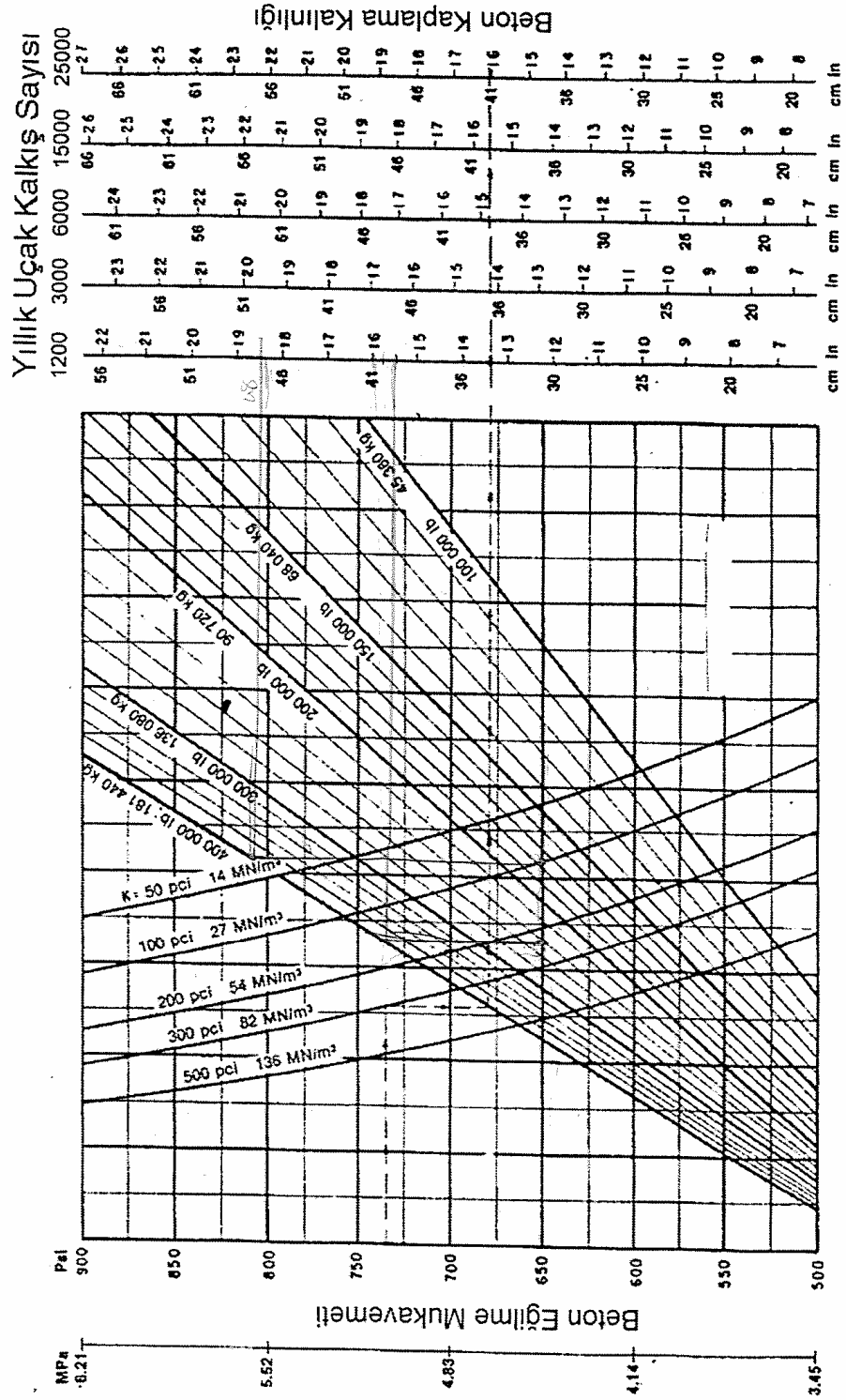
Tasarım Eğrileri

FAA tarafından önerilen tasarım eğrileri şekil 5.9'dan 5.11'e kadar gösterilmiştir. Bu tipteki diğer grafikler gibi bu eğriler, üstyapı kalınlığının belirlenmesinde kullanılmıştır. Verilen kalınlık değerleri (T) kritik alanlar içindir [12].

Kritik olmayan alanlar için FAA'nın kalınlık değer kriteri 0.9 (T) olmalıdır. Bu azaltma sadece beton kaplamaya uygulanır, temel tabakasına uygulanmaz. Bunun yanı sıra, üstyapının kenar bölümleri 0.7' ye(T) indirilmiştir, fakat toplam kalınlık (kaplama ve temel) kritik alanlarındaki ile aynıdır [12].



Şekil 5.9: Tek-Tekerlek Uçaklar için Rijit Üstyapı Tasarım Abağı (FAA)



Şekil 5.11: Çift-Tandem Tekerlek Uçaklar için Rijit Üstyapı Tasarım Abağı (FAA)

Tablo 5.2: Eşdeğer Kalkışları Hesaplamak için Federal Havacılık İdaresi Yöntemi

a. Eşitlikteki R Değerlerine Uygulanan Dönüşüm Katsayısı

UÇAK TİPİNDEN	UÇAK TİPİNE	DÖNÜŞÜM KATSAYISI (F)
tek tekerlek	çift tekerlek	0,80
tek tekerlek	çift tandem	0,50
çift tekerlek	çift tandem	0,60

b. Ölçüm Modeli için Uçaklar

UÇAK	KALKIŞLAR (R)	W ₂ TEKERLEĞE DÜŞEN YÜK
727-100	15.000	38.500
727-200	10.000	39.900
707-320 B	4.000	37.800
CV880	3.100	21.800
DC-9-32	11.000	25.200
DC-8-61	3.000	39.400

c. Tüm Uçakların DC-8-61'e Dönüştürülmesi (tasarım uçağı)

$$727-100 = 0,60 \times 15.000 = 9000 \quad \log R_1 = \log 9000 \left(\frac{38.000}{39.400} \right)^{1/2} \quad R_1=8150$$

$$727-200 = 0,60 \times 10.000 = 6000 \quad \log R_1 = \log 6000 \left(\frac{39.900}{39.400} \right)^{1/2} \quad R_1= 6270$$

$$707-320B= 1 \times 4.000 = 4000 \quad \log R_1 = \log 4000 \left(\frac{37.800}{39.400} \right)^{1/2} \quad R_1 = 3380$$

$$CV 880 = 1 \times 3.000 = 3100 \quad \log R_1 = \log 3100 \left(\frac{21.800}{39.400} \right)^{1/2} \quad R_1 = 400$$

$$DC-9-32 = 0,60 \times 11.000 = 6600 \quad \log R_1 = \log 6600 \left(\frac{25.200}{39.400} \right)^{1/2} \quad R_1 = 1140$$

$$DC-8-61 = 1 \times 3.000 = \quad R_1 = 1140$$

Toplam = 22340

Tablo 5.3: Federal Havacılık İdaresi, Kopma Modülüne Uygulanacak Güvenlik Faktörleri

KRİTİK UÇAKLARIN YILLIK EŞDEĞER KALKIŞLARI	GÜVENLİK FAKTÖRLERİ
1200 ve az	1,75
1200-3000	1,85
3000-6000	1,90
6000'den büyük	2,00

Havaalanlarında rijit üstyapı donatılı olarak yapılacaksa, yine aynı tasarım eğrileri kullanılmaktadır. Beton plakta donatı kullanılması halinde derz aralıkları daha fazla olacağından, derz dolgusundan ve bakımından belli bir ekonomik kazanç sağlamak mümkündür. Donatının amacı, plakta çatlamların oluşmasını önlemekten ziyade, çatlakların ayrışmasını önlemektir. Kullanılacak donatı miktarı (5.1) eşitliği ile hesaplanmaktadır [5].

$$A_s = \frac{0,64L\sqrt{L_t}}{f_s} \quad (5.1)$$

Burada;

A_s : Donatı alanı/genişlik veya uzunluğun her bir metresi için donatı alanı, cm^2

L: Plağın genişliği ve uzunluğu, m

T: Kaplamanın kalınlığı, mm

F_s : Donatının müsaade edilir çekme gerilmesi, MN/m^2 (10,2 kg/cm^2) dir.

Kullanılacak donatı hasır çelik veya çubuk olabilir. Boyuna bindirmeler minimum 30 cm veya boyuna donatı çapının en az 30 katı ve enine bindirmeler ise minimum 15 cm veya enine donatı çapının en az 20 katı olmalıdır. Boyuna donatılar minimum 10 cm ve maksimum 30 cm, enine donatılar ise minimum 10 cm ve maksimum 60 cm aralıkla döşenmelidir. Minimum porsantaj %0,05 olmalıdır. Porsantaj, donatı alanının (A_s) beton kesit alanına bölümünün 100 katıdır. Beton

kaplamada donatı kullanılması halinde, daha büyük plaklar yapılması mümkün olmaktadır.

FAA Yöntemi ile Tasarım Örneği

Aşağıdaki koşullar için, Federal Havacılık İdaresinin yöntemleri kullanılarak bir rijit üstyapı tasarlanmıştır [12].

Tasarım uçağı çift-tandem tipi uçak olup, ağırlığı 350000 lb (160000 kg) dir. Bu uçağın yılda 6000 eşdeğer kalkış yapacağı kabul edilmektedir. Zemin reaksiyon modülü değeri, $k= 200$ pci (54 MN/m^3) ve alt temel 8 inç (20 cm) için düzeltilmiş k değeri Şekil 5.8' den $k= 280$ pci olarak bulunmaktadır. Betonun eğilmede çekme gerilmesi 650 psi (45 kg/cm^2) dir.

Bu veriler doğrultusunda, Şekil 5.10 kullanılarak, beton plak kalınlığı 16 inç (41cm) olarak bulunmaktadır. Alt temel kalınlığı artırılarak yeniden bir beton plak kalınlığı bulunarak mukayese edilip en ekonomik çözüme karar verilmelidir. Burada, sonuç olarak, 41 cm beton plak ve 20 cm temel tabakası yapılması halinde, üstyapı yılda 6000 kalkış yapan 350000 lb(160000 kg) ağırlığındaki tasarım uçağına 20 yıl hizmet verebilecektir.

5.3 Ampirik Analitik Yöntemler

5.3.1 Portland Çimento Birliği Yöntemi

Portland Çimento Birliği tarafından her uçak tipi için tasarım eğrisi geliştirilmiştir. İki tip uçak için tasarım eğrisi Şekil 5.11 ve 5.12'de verilmiştir. Betonun elastisite modülü 4,000,000 psi, betonun poisson oranı ise 0.15 olarak alınmıştır [5].

Tasarım yönteminde, esas alınan parametreler, diğer yöntemlere benzer olarak, betonun kopma modülü , zeminin dayanımı (zemin reaksiyon modülü), uçak tekerlek düzeni, uçak yükü , kalkış sayısı ve tasarım alanı (pist, apron, taksiyolu) dir.

Şekil 5.11 ve 5.12' de düşey skala, kırış kırılma analizleri sonucu belirlenen kopma modülünü göstermektedir. Yaklaşık güvenlik faktörü, grafiğe işlenmeden önce, bu

değere uygulanmalıdır. Bu grafikler ayrıca, kaplamanın çeşitli tekerlek yükleri altındaki dayanımını belirlemek için de kullanılmaktadır [5].

Betonun kopma modülü, 7, 14, 28 ve 90 günlük deneyler ile saptanmaktadır. Beton üstyapı tasarımı için genellikle 90 günlük kopma modülü değeri kullanılmaktadır [30]. Tasarımda kullanılacak kopma modülü Eşitlik 5.2 ile hesaplanmaktadır [32].

$$DMR = MR_{90} \left(1 - \frac{C.V.}{100} \right) M \quad (5.2)$$

Burada,

DMR = Tasarım kopma modülü (psi),

MR₉₀ = 90 günlük ortalama kopma modülü (psi),

C.V. = kopma noktasındaki değişim katsayısı (%) dır.

M = tasarım ömründeki ortalama kırılma miktarı faktörü olup, yaşla artan beton dayanımını tanımlar ve genellikle 1.10 olarak alınmaktadır.

Değişim katsayısı, standart sapmanın ortalama değere oranı olarak tanımlanır. Mükemmel bir inşaat kontrolüne sahip beton için % 10, iyi kontrol için %10-15, vasat kontrol için % 20 esas alınan C.V değerleridir [5].

Yorulmaya Dayalı Tasarım

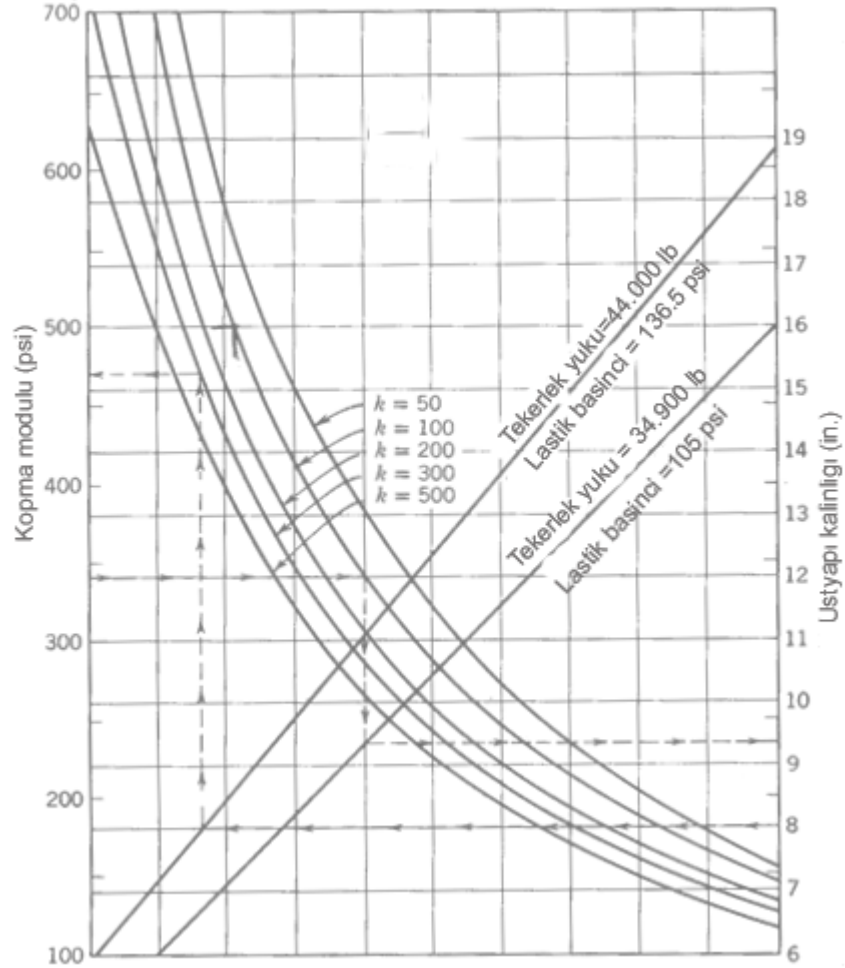
Şekil 5.12 ve 5.13'te gösterildiği gibi tasarım eğrileri, kritik tasarım uçağı kavramını kullanmaktadır. Bununla beraber, sahaya karmaşık bir hava trafiği hakim olursa yorulma kavramını kullanmak gerekmektedir [5].

Beton plağın taşıyacağı birçok yük uygulaması, betonun özelliklerini ve yükün büyüklüğünü içeren sayısız etkene bağlıdır. Genel durumlar için, birçok çeşit betonu içeren ortalama yorulma verisi kullanılmaktadır. Tekrarlı yükler altında, beton plağın ömrünü belirleyen en önemli etken, yükün büyüklüğüdür [5].

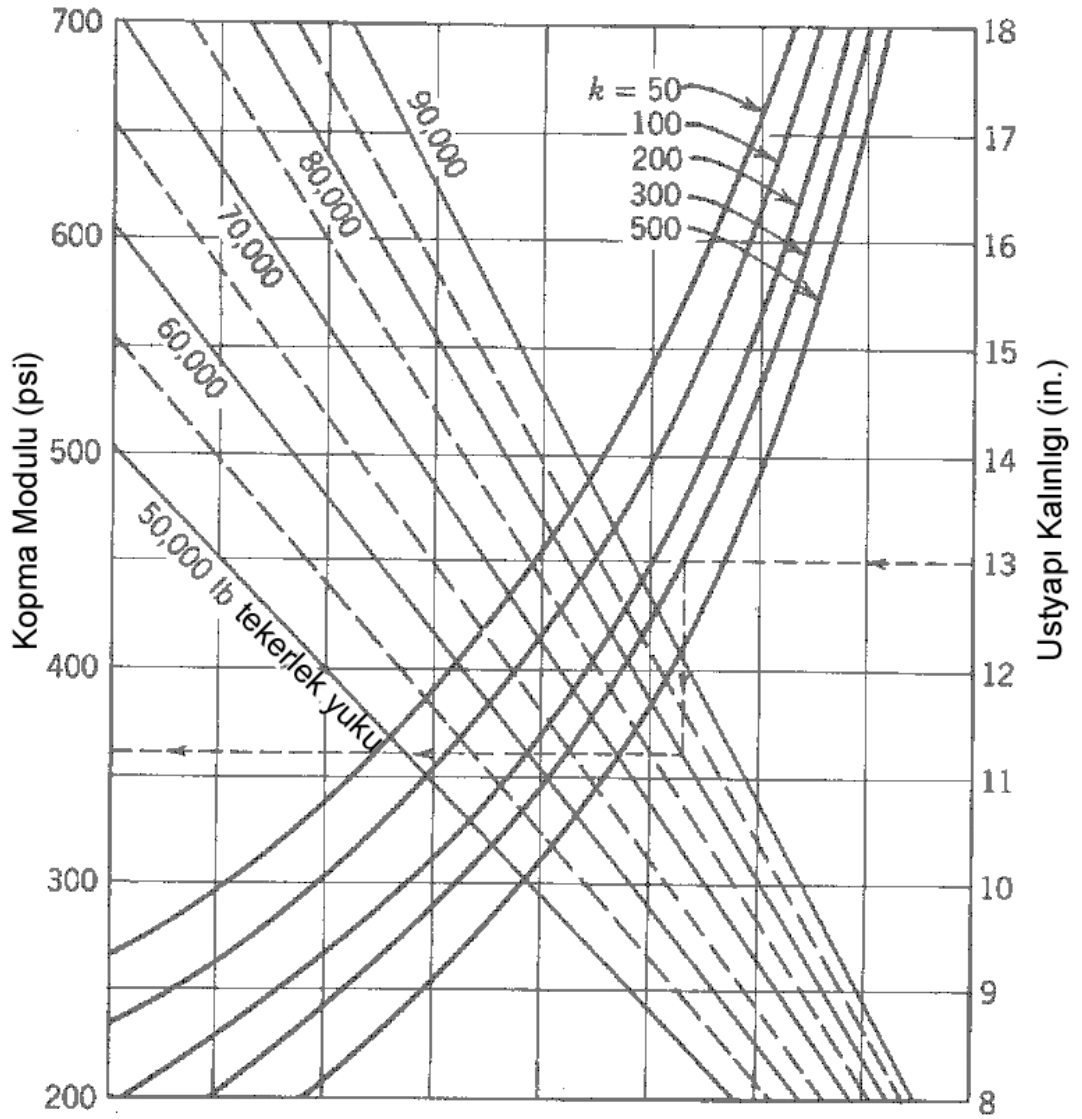
Tablo 5.4, Portland Çimento Birliği tarafından önerilen olası tekrarlanan yük ve gerilme oranlarını göstermektedir. Bu oranlar, karayolu beton üstyapı tasarımında kullanılan oranlarla hemen hemen aynıdır . Bu oranın (olası gerilimin mevcut

gerilim oranına bölünmesiyle ortaya çıkan oran) 0.51'in altında olması, betonun sonsuz sayıda yük uygulamasını gerçekleştirebileceği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, bu oran artarsa mevcut yük tekrar sayısı buna bağlı olarak düşmektedir [32].

Bu yöntemde, öncelikle, üstyapıyı kullanacak uçak sayısının belirlenmesi ve bu veriler sonucu her bir tekerlek altındaki gerilmenin hesaplanması gerekmektedir. Belirlenen herhangi bir yük için yorulma oranı, daha sonra, mevcut tekrarın olası yük tekrarına bölünmesi ile elde edilmektedir. Eğer bu oranların toplamı, Eşitlik 5.3' te ortaya konan birimden küçük ya da eşit ise, üstyapı kalınlığı yetersiz kalmayacaktır [32].



Şekil 5.12: DC9, Çift Tekerlek ve 24 inç İçin Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri (Portland Çimento Birliği).



Şekil 5.13: Boeing 727, Çift Tekerlek ve 34 inç İçin Rijit Üstyapı Tasarım Eğrileri (Portland Çimento Birliği).

$$\frac{N_1}{N'_1} + \frac{N_2}{N'_2} + \dots + \frac{N_n}{N'_n} \leq 1.10 \quad (5.3)$$

Burada;

N = gerçek yük tekrar sayısı (kalkış sayısı)

N' = izin verilebilir tekrar sayısı (kalkış sayısı) dır.

Tablo 5.4: Gerilim Oranları ve Olası Tekrarlanan Yükler

Gerilme oranı	Olası yük tekrar sayısı	Gerilme oranı	Olası yük tekrar sayısı
0,51	400,000	0,63	14,000
0,52	300,000	0,64	11,000
0,53	240,000	0,65	8,000
0,54	180,000	0,66	6,000
0,55	130,000	0,67	4,500
0,56	100,000	0,68	3,500
0,57	75,000	0,69	2,500
0,58	57,000	0,70	2,000
0,59	42,000	0,71	1,500
0,60	32,000	0,72	1,100
0,61	24,000	0,73	850
0,62	18,000	0,74	650

^a Yük gerilmesinin, kopma modülüne oranı.

Tablo 5.5 Çeşitli Uçaklar İçin Tekrarlanan Yük Faktörleri

YÜK TEKRARI FAKTÖRÜ				
Uçak	Taksi yolu		Pist alanı	
	$\sigma = 24$ in.	$\sigma = 48$ in.	$\sigma = 96$ in.	$\sigma = 192$ in.
DC-3	0,12	0,07	0,05	0,03
B-727	0,41	0,23	0,13	0,09
DC-8 ve B-707	0,83	0,46	0,25	0,17
B-747	0,58	0,38	0,33	0,28
C5A	0,74	0,61	0,37	0,25
B-2707 ^a	0,52	0,39	0,22	0,16
Concorde	0,83	0,44	0,23	0,15
DC-10-10 ve L1011	0,57	0,40	0,22	0,12

Tablo 5.6 Karmaşık Trafik İçin Hesap Örnekleri

Kaplama $t = 14$ in k Modülü = 300 pci		Kopma Modülü (MR) =600 psi Tasarım MR = 1.1 (1- .2). (600) =528 psi		C.V. = % 20		M = 1.1		
(1)	(2)		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Uçak	Dingil yükü (kip)	Gerilme (psi) ^a	Gerilme Oranı	Kalkış	LRF ^b	Gerçek kalkış sayısı	Olası kalkış sayısı	Yorulma (%)
DC-8	148	310	0,59	5.000	0,83	4.150	42,000	9,9
B 707	157	305	0,58	11.000	0,83	9.130	57,000	16,0
B 747	166	310	0,59	4.000	0,58	2.320	42,000	5,5
DC 10	194	315	0,60	2.000	0,57	1.140	32,00	3,6
B 727	77	300	0,57	83 500	0,41	34.235	75,000	45,6
DC 9	43	200	0,38	95 000	-	-	limitsiz	-
Diğer	-	-	-	1.530.000	-	-	limitsiz	-
							Toplam=	80,6

a PCA tarafından geliştirilen tasarım eğrilerinden alınmıştır. (Şekil 5.11 ve 5.12 gibi)

b Tablo 5.5'den alınmıştır.

PCA Yöntemi ile Tasarım Örneği

Tablo 5.6, yukarıda da ele alınan, yorulmaya bağlı tasarım yöntemini ortaya koymaktadır. Birinci sütun, değerlendirme altındaki uçakları, ikinci sütun, Şekil 5.11 ve 5.12 gibi tasarım eğrilerinde belirtilen uçakların ortaya koyduğu yük ve gerilim miktarını, üçüncü sütun ise, Tablo 5.4 de verilen gerilme koşulları altındaki gerilme oranlarını göstermektedir [5].

6. sütundaki yük tekrar sayısı, 7. sütundaki olası tekrar sayısına bölünmüş ve bu değerler 8. sütunda yüzde olarak ifade edilmiştir. 8. sütunun toplamının, yüzde yüzden az olması sebebiyle tasarım uygun kabul edilmektedir [5].

5.3 Rijit Havaalanı Üstyapılarında Diğer Yapım Esasları

5.3.1 Temel Tabakası

Drenaj, dona karşı koruma, büzülme kontrolü ve zeminin şişmesi, ilave yapısal kapasite ve pompaj olayını önlemek gibi birçok nedenle, rijit hava alanı kaplamaları altında granüler temel tabakası kullanılmaktadır. Taban zemininin güçlendirilerek ince temel tabakası uygulamak genellikle ekonomik olmayan bir çözümdür. Bu ayrıca havaalanı kaplama tabakasının alan performansına dayandırılır. Bu ayrıca her problem için ayrı bir ekonomik zemine oturtularak kontrol edilmelidir [5].

Ayrıca, donma etkisindeki temel tabakası, donmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Granüler tanecikler, tanelerin ağırlığının % 3'ünden daha az olup, 0.02 mm.den daha küçük boyutta taneciklere sahip olmalıdır. Bazı durumlarda, silt gibi diğer dona dayanıksız malzemeleri ayırmak, büyük bir alanda kalın temel malzemesini kullanmaktan daha ekonomik olmaktadır. Bunun yanısıra; zemin ve sahanın iklim koşullarıyla ilgili bir çalışma yapmak gereklidir. Bazı durumlar, üstyapının pompaj olayına karşı bir temel tabakası içermesini gerektirmektedir. Pompaj olayı, havaalanı üstyapılarında, kaplama ağır yüke tabi tutulmuyorsa, genellikle bir sorun oluşturmamaktadır [5].

Temel tabakası zeminin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Bu bakımdan, zemin modülünün belirlenmesinde hesaba katılmalıdır. Plaka yükleme deneyleri doğrudan zemin üzerinde ve temel tabakası üzerinde yapılabilir. Temel tabakasının arttırılmasıyla taban zemini reaksiyonundaki artış analitik analizlerle saptanabilmektedir [5].

5.3.2 Kompaksiyon Gereksinimi

Taban zemini, kaplama ya da temel tabakası için en uygun temeli sağlamak amacıyla oluşturulmalıdır. Genel olarak, kompaksiyon ile yüksek dereceli bir yoğunluk sağlanması rijit havaalanı kaplamaları için garantili olmayabilir. Bununla birlikte, kesin minimum gereksinim gerçekleştirilmelidir. Mühendisler Kurulu'nun kompaksiyon gereksinimlerine göre, sıkıştırma, kohezyonsuz kum ve kumlu çakıllı

zemin için, zeminin üst 6 inç (15,25 cm) lik kısmı, % 90 yapılmalıdır. Kompaksiyon ayrıca dolgu alanlarına da uygulanmaktadır.

Kohezyonsuz kum ve çakıl için, dolgu alanlarının üstten 6 inç (15,25 cm) lik bölümü % 100 oranında sıkıştırılmalıdır. Kalan dolgu % 95 oranında da sıkıştırılabilir. 10 inç (25.4 cm) 'den ince kalınlığa sahip temel tabakası % 95 oranında sıkıştırılmalıdır. Kalınlığın en üstten 6 inç (15,25 cm) lik kısmı % 100 yoğunluğa, geri kalanı ise % 95 yoğunluğa getirilmelidir [5].

5.6 Derz ve Donatı Gereksinimi

Birçok etkene dayanan havaalanı üstyapılarında çok çeşitli derz yerleşimleri kullanılabilir. Bu yerleşimler çelik içermeyen kısa plakları (20-25 feet) içermektedir. Eğer daha uzun plaklar kullanılacaksa, sıcaklığa dayanıklı kayma demirleri kullanılmalıdır. Kullanılacak plakların uzunluğunu, güçlendirmeye bağlı olarak seçmek tasarımcının tercihidir. Plak boyutunu belirleyen faktörlerden biri de inşaat gereçleridir. 40 ila 50 feet (12-15 m) arası genişlikte üstyapıya imkan sağlayan inşaat gereçleri mevcut ise, mühendis istediği büyüklükte plak kullanabilir.

Herhangi bir beton plakta, tüm derzlerde yük aktarımını sağlamak gereklidir. Yük transferi; kayma demirleri, bağlantı demirleri veya belki stabilize alt temel tabakası kullanarak sağlanabilmektedir [5].

Plak Boyutu

Tablo 5.7, birçok kurum tarafından önerilen plak boyutlarını göstermektedir. Burada, plak boyutu beton plağın malzemesinden ve güçlendirme için kullanılacak çeliğin miktarından bağımsızdır.

Tablo 5.7' deki verilere ek olarak, Eşitlik 5.4'de donatılı üstyapı için maksimum plak boyu ifade edilmiştir. Bu ifade;

$$L = \sqrt[3]{0.00047h(f_s p)^2} \quad (5.4)$$

şeklindedir.

Burada;

L = maksimum uzunluk (boyuna ya da enine),

h = plak kalınlığı (in).,

f_s = çeliğin eğilme gerilmesi,

p = çelik oranı

olmaktadır.

Boyuna Derzler

Boyuna derzler, inşaat şeritlerine paralel olup, iki genel tiptedir. Müteahhidin seçimine bağlı olarak, derzlerde yük transferi için kayma demirleri kullanılmaktadır. Bazı durumlarda derz tipi tasarım mühendisi tarafından belirlenmektedir. Plâğın eni genellikle en azından bir bölümünde inşaat gereçlerine dayanarak belirlenmektedir [5].

Tablo 5.7: Derz Yerleri

		DÜZ BETON		GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON	
Kurum	Tabaka kalınlığı (in)	Boyuna (ft)	Enine (ft)	Boyuna (ft)	Enine (ft)
FAA	9 ya da daha az 9-12 12den fazla	12.5 20 25	15 20 25		
PCA	12 ya da daha az	12.5 maks.	15-20	12.5 maks	30-40
	12-15 ayrılmış trafik 15den çok ve 12-15ayrılmamış trafik	12.5 maks. çeşitli	25-30 25-30	12.5 maks. çeşitli	50 50
Mühendisler Kurulu	9 ya da daha az 9-12 12den fazla	12.5 20.0 maks. 25.0 maks.	15 maks. 20.0 maks 25.0 maks.		

6. TÜRKİYE’ DE KARAYOLU ve HAVAALANI ÜSTYAPI TASARIMI UYGULAMALARI

Türkiye’ de Karayolu esnek üstyapı tasarımı için, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü’ nün ‘Üstyapı Projelendirme Rehberi’ yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu rehber ampirik-analitik AASHTO 1993 esnek üstyapı tasarımını esas almaktadır. Ancak, karayolu rijit üstyapı tasarımı için henüz böyle bir kaynak mevcut değildir. Geçmişte olduğu gibi, günümüzde de ülkemizde karayollarında rijit üstyapıların uygulaması tercih edilmemektedir. Bu tez kapsamında Bursa-Eskişehir devlet yolu, İnegöl-Bozüyük arası üstyapı projesi referans alınarak, 7. Bölümde esnek ve rijit üstyapı tasarımları yapılmıştır. Bu bölümde, bu projeye ait veriler ile uygulamadaki üstyapı tabaka kalınlıkları değerleri sunulmuştur.

Günümüzde, Türkiye’ de havaalanı üstyapı tasarımı ile ilgili “Aedrome Design Manual (DOC 9157-AN/901)” Part 3 “Pavements” esas kaynak olarak ve FAA üstyapı tasarım yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Nato Enformasyon Dairesi Başkanlığı, Hava Kuvvetleri Komutanlığı ve Ulaştırma Bakanlığına bağlı DLH Genel Müdürlüğü tarafından ampirik yöntemlerden ACN/PCN ve FAA yöntemleri kullanılmaktadır.

2007 yılında yapımı devam eden Elazığ Havaalanı ile ilgili, Ulaştırma Bakanlığı DLHM İnşaatı Genel Müdürlüğü, Etüt proje Dairesi Başkanlığı, Kaplama Dizayn Şube Müdürlüğü tarafından hazırlanan ve “Elazığ Havaalanı Kaplama Kalınlıkları Raporu” tasarım verileri alınarak, bu çalışmanın 7. bölümünde esnek ve rijit üstyapı tasarımları yapılmıştır. Bu bölümde ise, bu projenin verileri ile uygulamadaki üstyapı kalınlığı değerleri verilmiştir.

Bursa-Eskişehir Devlet Yolu İnegöl Bozüyük Arası Esnek Üstyapı Projesi (Km 47+456-100+225) tasarım verileri ve üstyapı kalınlıkları aşağıda verilmiştir [33].

Tasarım verileri:

$P_0 = 4.5$ (ilk hizmet yeteneği indeksi)

$P_t = 2.5$ (son hizmet yeteneği indeksi)

$D_y = 0.5$ (2 yönlü trafik)

$D_ş = 0,90$ (bir yönde iki şerit)

Proje süresi: 20 yıl

Trafik Grupları

TRAFİK GRUPLARI	TREYLER	KAMYON	OTOBÜS	OTOMOBİL
YOGT Sayım yılı 2002	268	2434	402	2882
Trafik artış katsayısı, %r	4	4	5	5

Üstyapı Tabaka Kalınlıkları:

Asfalt betonu aşınma tabakası 5 cm – Yollar Fenni Şartnamesi 74. Kısım

Asfalt betonu binder tabakası 7 cm – Yollar Fenni Şartnamesi 74. Kısım

Bitümlü temel tabakası 11 cm – Yollar Fenni Şartnamesi 84. Kısım

Plentmix temel tabakası 20 cm – Yollar Fenni Şartnamesi 67. Kısım

Alt temel tabakası – Yollar Fenni Şartnamesi 66. Kısım

Farklı zemin dayanımları için alt temel tabakasının kalınlıkları

KİLOMETRE	CBR %	ALT TEMEL KALINLIĞI (CM)
47+450-59+100	18,0	PMT+5
59+100-59+820	13,0	15
62+200-63+020	12,0	15
74+930-75+500	KAYA	15 (düzeltme amaçlı)

Elazığ Havaalanı Kaplama Kalınlıkları Raporu tasarım verileri ve üstyapı kalınlıkları aşağıda verildiği gibidir [34].

Tasarım verileri:

Granüler alt temel elastisite modülü LCN/LCG : 100-120/I

Tasarım Uçak brüt ağırlığı : 400.00lb, 181.440 Kg (Dual Tandem)

Yıllık Kalkış sayısı : AD1200

Zemin sınıfları: E-7/ E-8-CL/CH/a-7-6

Zemin şişme Yüzdeleri : E-7 (%3.6); E-8(%5.7)

Y.A.S.S. : > 10-12.m.

Donma Penetrasyon : (DI: 300⁰ C-gün)

Toprak zemin k'sı : k= 100-150 lb/inç³

Zemin ort. Lab. ICBR : E-7 (%6.6, E-8 (%3.9)

Beton Eğilme-Gerilme : 650 psi, 45kg/cm²

Üstyapı Kalınlıkları

Pist, apron ve taksiyolu (pat) kritik alanlarında (pist başları v.b) asfalt kaplama kalınlıkları:

-5 cm Aşınma	DLH 8-R Şartnamesine göre,
-5 cm Binder	DLH 8-R Şartnamesine göre,
-30 cm Bitümlü Temel	DLH 8-A Şartnamesine göre,
-60 cm Kum-Çakıl temel altı	DLH 2-R Şartnamesine göre,
100 cm toplam kaplama kalınlığı	

Pist, apron, taksiyolu gövdesinde beton kaplama kalınlığı:

-35 cm Çimento Beton	DLH 9-R Şartnamesine göre,
-15 cm. Zayıf Beton	DLH 4-B Şartnamesine göre,
-35 cm. Kum- Çakıl temel-altı	DLH 2-R Şartnamesine göre,
85 cm toplam kaplama kalınlığı	

Çimento betonu; Elastisite Modülü 40000 Mpa (N/mm²), poisson oranı 0,2

Zayıf beton; Elastisite modülü 15000 Mpa(N/mm²), poisson oranı 0.3, [15].

7. KARAYOLU VE HAVALANI ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölüm kapsamında; karayolu üstyapı tasarımı için AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 1993 Tasarım Yöntemi ve havaalanı üstyapı tasarımı için FAA (Federal Havacılık İdaresi) Yöntemi kullanılarak esnek ve rijit üstyapı tasarımları yapılmış ve karayolu ile havaalanı tasarım yöntemleri, bu iki yöntem esas alınarak, tasarım parametreleri açısından karşılaştırılmıştır.

Türkiye’de karayolu üstyapı tasarımı için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından AASHTO 93 yöntemi ve havaalanı için DLH Genel Müdürlüğü tarafından FAA yöntemi kullanılmaktadır. AASHTO ve FAA yöntemleri, hem esnek üstyapı tasarımı, hem rijit üstyapı tasarımı için kullanılabilir. Bu bakımdan, karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımlarının karşılaştırması için bu iki yöntem seçilmiştir. AASHTO 93 yöntemi analitik-ampirik, FAA yöntemi ampirik yöntemdir. Analitik yöntemler, uygulamalarının karmaşık olması ve kapsamı itibarıyla bu bölümde tasarım örneği olarak tercih edilmemiştir.

Çalışmada Türkiye’de uygulanmış olan örneklerden alınan veriler kullanılarak bu yöntemler ile üstyapı tasarımı yapılacak, hem esnek üstyapı için, hem rijit üstyapı için karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sonuçlar değerlendirilmiştir.

7.1 AASHTO 1993 Ampirik-Analitik Tasarım Yöntemi ile Karayolu Üstyapı Tasarımı

Trafik sayımları ve zemin ile ilgili bilgiler, Bursa-Eskişehir Devlet yolu İnegöl-Bozüyük arası esnek üstyapı projesinden alınmıştır. Yol, dört şeritli, çift yönlü bölünmüş yoldur.

7.1.1 Esnek Üstyapı Tasarımı

Tasarım Parametreleri

$P_0 = 4.5$ (ilk hizmet yeteneği indeksi)

$P_t = 2.5$ (son hizmet yeteneği indeksi)

$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4.5 - 2.5 = 2.0$ (proje hizmet yeteneği kaybı)

Zaman ;

Analiz periyodu, $t = 20$ yıl esas alınmıştır.

Güvenilirlik;

R: % 95 (Tablo 2.5) güvenilirlik değeri

$S_0 : 0.35$ (toplam standart sapma)

$Z_R : -1.645$ (standart normal sapma)

Trafik;

$W_{8.2}'$: İki yöndeki toplam 8,2 ton eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı

$W_{8.2} =$ Hesap şeridindeki (tek yönde) ortalama günlük standart dingil sayısı,

$D_y = 0.5$ (2 yönlü trafik), $D_ş = 0,90$ (bir yönde iki şerit)

$r = \% 5$ (trafik artış oranı)

TRAFİK GRUPLARI		TREYLER	KAMYON	OTOBÜS	OTOMOBİL	TOPLAM
YOGT sayım yılı	2002	268	2434	402	2882	
İlk trafik t_0 , $t_0 = t_{2002} (1+r)^t$	2008	359	3261	538	3862	
$T_0 = t_0 \times 365$		131035	1190265	196370	1409630	
Taşıt eşdeğerlik faktörü, (TEF) (ticari araç/gün)		3.06	2.18	0.95	0.0006	
$W_{8.2}' = T_0 \times TEF$		400770	2594420	186515	1095	3182800
$W_{8.2} = W_{8.2}' \times D_y \times D_ş$		180346	1167489	83931	492	1432258

$$W_{8.2} = 1,5 \times 10^6 \text{ ESDY}, \quad W_{8.2}(t) = W_{8.2} * \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right] \text{ (t yıl sonraki tasarım trafiği)}$$

T (YIL)	$W_{8.2} \times 10^6$
13	26.56
14	29.40
15	32.37
16	35.49
17	38.76
18	42.19
19	45.81
20	49.60

Malzeme ve zemin özellikleri;

Km 62+200-63+020 arası CBR değeri: %12

Taban zemini esneklik modülü (M_R),

$$M_R = 1500 \times \text{CBR} \text{ (psi)}$$

$$M_R = 18000 \text{ psi, (kg/cm}^2\text{)}$$

Asfalt betonu aşınma tabakası $E_{AC} = 400\,000 \text{ psi}$

Asfalt betonu binder tabakası $E_{AC} = 370\,000 \text{ psi}$

Bitümlü temel elastisite modülü $E_{BS} = 200\,000 \text{ psi}$

Granüler temel elastisite modülü $E_{BS} = 32\,000 \text{ psi}$

Granüler alt temel elastisite modülü $E_{SB} = 20\,000 \text{ psi}$

Tabaka katsayıları;

Asfalt betonu aşınma tabakası izafi mukavemet katsayısı a_{11} : 0.42 (Ek-2 Şekil.1'den)

Asfalt betonu binder tabakası izafi mukavemet katsayısı a_{12} : 0.40 (Ek-2 Şekil.1'den)

Bitümlü temel tabakası izafi mukavemet katsayısı ; $a_{21} = 0.249 \times \log E_{BS} - 0.977 = 0.34$

Granüler temel tabakası izafi mukavemet katsayısı; $a_{22} : 0.249 \times \log E_{BS} - 0.977 = 0.15$

Granüler alt temel izafi mukavemet katsayısı ; $a_3 = 0.227 \times \log E_{SB} - 0.839 = 0.13$

Temel ve alt temele ait drenaj katsayıları;

İyi drenaj ve üstyapının doygunluk seviyesine yakın rutubete maruz kaldığı sürenin yıl içindeki yüzdesi %1-5

m_1 = temel drenaj katsayısı 1.00

m_2 = alt temel drenaj katsayısı 1.00

Çözüm:

1) SN, üstyapı sayısı eşitlik (2.15) ile hesaplanmıştır.

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

Bu bağtıda veriler yerine konularak, iterasyon yoluyla SN değeri bulunmuştur. SN değeri 4.46 için bu eşitlik sağlanmıştır. Şekil 2.5 abağı yardımı ile de aynı sonuç bulunabilir.

2) Zemin şişmesi ve don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde oluşan kayıp nedeniyle, performans periyodunda azaltma yapılarak, deneme-yanılma ile ideal performans periyodu tayin edilir. Bunun için aşağıdaki tablo hazırlanmıştır.

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{\text{trafik}} + \Delta PSI_{\text{şişme}} + \Delta PSI_{\text{don kabarması}}$$

NO	TAHMİNİ PERFORMANS PERİYODU	ŞİŞMEDE N KAYNA KLANAN HİZMET YETENE Ğİ KAYBI $\Delta PSI_{\text{ş}}$	DONMA KABARMASI NDAN HİZMET YETENEĞİ KAYBI ΔPSI_{DK}	$\Delta PSI_{\text{ş}} / \text{DK}$	TRAFİĞE BAĞLI HİZMET YETENEĞİ KAYBI ΔPSI_{TR}	KABUL EDİLEBİLİ R KÜMÜLAT İF TRAFİK (10 ⁶)	TEKABÜL EDEN PERFORMANS PERİYODU
1	15	0.17	0.25	0.42	1.58	32.60	15,1

Şişme oranı sabiti, $\theta = 0.08$

Şişme olasılığı, $P_{\phi} = \%40$

Potansiyel düşey yükselme, $V_R = 2$ inç için Şekil 2.6' dan $\Delta PSI_{\phi} = 0.17$ olarak okunmuştur.

Don kabarması oranı, $\phi = 3\text{mm/ gün}$

Don kabarması olasılığı, $P_k = \% 30$

$\Delta PSI_{\max} = 2$ için Şekil 2.7'den $\Delta PSI_{dk} = 0,25$ olarak okunmuştur.

Eşitlik (2.15) ile $SN = 4.46$, $\Delta PSI_{TR} = 1.58$ verileri kullanılarak, kabul edilebilir kümülatif trafik (ETDY) bulunmuştur. Buna tekabül eden performans periyodu ile tahmini performans periyodu arasındaki fark 1' den küçük olduğu için, performans periyodu süresi 15 yıl alınmıştır. (Bu farkın 1'den büyük olması halinde, farklı performans periyodu tahminleri ile iterasyona devam edilmesi gerekmektedir.)

3) Gerekli tabaka kalınlıklarının hesabı aşağıda yapılmıştır.

$W_{8.2} = 32.37 \times 10^6$, $\Delta PSI = 1.58$, $E_{BS} = 200\ 000$ psi verilerinin (2.15) eşitliğinde yerine konması ile veya Şekil 2.5 aracılığı ile ;

$SN_1 = 1,74$ olarak bulunmuştur.

$$D_1^* = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{1.74}{0.42} = 4.142 \cong 4.14 \text{ inç} = 105 \text{ mm}$$

$D_1 = 5\text{cm}$ aşınma, $D_{11} = 6\text{cm}$ binder tabakası için;

$$SN_1^* = a_{11} \times D_{11} + a_{12} \times D_{12}$$

$$SN_1^* = (5 \times 0.42 + 6 \times 0.40) / 2.54 = 1.77 \geq 1.74$$

$E_{BS} = 32\ 000$ psi için eşitlik (2.15) ile, $SN_2 = 3.59$ olarak bulunmuştur.

$$D_{21}^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_{21}} = \frac{3.59 - 1.77}{0.34} = 5.35 \text{ inç} = 135 \text{ mm}$$

$$SN_2^* = 0.34 \times 5.35 = 1.82$$

Granüler alt temel, $E_{SB} = 20\ 000$ psi eşitlik (2.15) ile, $SN_3 = 4.28$ olarak bulunmuştur.

$$D_{22}^* = \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_{22} \times m_1} = \frac{4.28 - (1.77 + 1.82)}{0.15 \times 1.00} = 4.6 \text{ inç} \cong 115 \text{ mm}$$

$$SN_3^* = 0.15 \times 1.00 \times 4.60 = 0.69$$

$$D_3^* = \frac{SN - (SN_1^* + SN_2^* + SN_3^*)}{a_3 \times m_2} = \frac{4.46 - (1.77 + 1.82 + 0.69)}{0.13 \times 1.00} = 1.40 \text{ inç} \cong 40 \text{ mm}$$

Toplam üstyapı kalınlığı = 5cm (aşınma)+ 6cm (binder) + 13,5cm (bitümlü temel) + 11,5 cm (granüler temel)+ 15 cm (granüler alt temel) = 51 cm

7.1.2 Rijit Üstyapı Tasarımı

Esnek üstyapı tasarımı ile ortak olan parametrelerin değerleri aynı alınmıştır. Proje trafiği hesabı burada tekrar gösterilmemiştir.

Tasarım Parametreleri

$P_0 = 4.5$ (ilk hizmet yeteneği indeksi)

$P_t = 2.5$ (son hizmet yeteneği indeksi)

$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4.5 - 2.5 = 2.0$ (proje hizmet yeteneği kaybı)

Zaman ;

$t = 20$ yıl tasarım ömrü esas alınmıştır.

Güvenilirlik;

R: % 95 (Tablo 2.5) güvenilirlik değeri

$S_0 : 0.35$ (toplam standart sapma)

$Z_R: -1.645$ (standart normal sapma)

Trafik;

$W_{8.2} = 1,5 \times 10^6$ ESDY,

$W_{t,8.2} = 49,60 \times 10^6$ (t=20 yıl)

Malzeme ve zemin özellikleri;

Km 62+200-63+020 arası CBR değeri: %12

Taban zemini reaksiyon modülü (k), Şekil 3.4'ten CBR %12 için 210 pci (lb/inç³) olarak okunmuştur.

Portland çimentolu kaplama plağının elastisite modülü $E_c = 4200000$ psi

Granüler alt temel elastisite modülü $E_{SB} = 20\ 000$ psi

Beton kopma modülü: $S_c' = 578$ psi (28 günlük)

Drenaj katsayısı;

$C_d = 1.00$ seçilmiştir.

Yük Transfer katsayısı;

$J = 2,8$ seçilmiştir. Derz aralığı 30 ft' dir.

Destek kaybı;

$LS = 1,0$ seçilmiştir.

Çözüm:

1) d, portland çimentolu kaplama plağının kalınlığı eşitlik (3.5) ile hesaplanmıştır.

$$\log_{10} W_{t18} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10}(d+1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(d+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 \cdot p_t) \log_{10} \left[\frac{S_c C_d (d^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \left[d^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c / k)^{0,25}} \right]} \right]$$

plak kalınlığı, d= 15 inç =38 cm olarak bulunmuştur.

38 cm beton plak

15 cm granüler alttemel tabakasıdır.

2) Zemin şişmesi ve don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde oluşan kayıp nedeniyle performans periyodunda azaltma yapılarak, deneme-yanılma ile ideal performans periyodu tayin edilir. Esnek üstyapı tasarımında uygulanan aynı işlemler ile performans periyodu bulunmaktadır.

7.2 FAA Ampirik Tasarım Yöntemi ile Havaalanı Üstyapı Tasarımı

Yük, tekerlek düzeni ve zemin ile ilgili bilgiler ‘Elazığ Havaalanı Kaplama Kalınlıkları Raporu’ ndan alınmıştır.

7.2.1 Esnek Üstyapı Tasarımı

Tasarım Parametreleri

Zaman;

20 yıllık tasarım ömrü esas alınmıştır.

Yük;

Tasarım uçağı brüt ağırlığı = 400 000lb (181440 kg)

Tekerlek Düzeni ve Geometrisi

Seçilen tasarım uçağı çift tandem uçaktır.

Trafik Hacmi;

Yıllık kalkış sayısı: AD1200

Malzeme ve zemin özellikleri;

Zemin sınıfı: E7

Zemin ort. lab CBR: E-7 (%6.6)

Donma-penetrasyon : (DI=300⁰ –gün)

300⁰- gün için donma-penetrasyon indeksi Şekil 5.4 ‘ten 25 inç=63,5 cm dir.

Tablo 4.7’ den E-7 zemin sınıfına karşılık, FAA sınıfı don etkisi dikkate alınarak F-7 alınmıştır. Tablo 4.8’ den F-7 sınıfı 6,5 CBR değerine karşılık gelmektedir.

Çözüm:

1)Toplam üstyapı kalınlığı Şekil 4.9’ dan bulunmaktadır. CBR 6,5 değerinden aşağı doğru brüt uçak kütlesi olan 181440kg değerine inilir. Buradan yıllık uçak kalkış sayısına (1200) geçilir. Bu noktadan, üstyapı kalınlık değerlerine geçilerek, toplam üstyapı kalınlığı 39 inç (99 cm) olarak okunmaktadır.

2)Şekil 4.10 yardımıyla Minimum temel tabakası değeri 14,5 inç (37 cm) olmalıdır. CBR: 20 değeri için Şekil 4.9'dan temel üstü toplam kalınlık 15,4 inç(39 cm) olmalıdır. Alt temel kalınlığı $39-15,4 = 23,6$ inç (60 cm) olmaktadır.

3)Bitümlü kaplama tabakası ise Şekil 4.9' da belirtildiği gibi kritik alanlar için 10cm kritik olmayan alanlar için 8 cm. dir.

4)Temel tabakasının kalınlığı ise $39-10 = 29$ cm olmaktadır.

5)Kritik olmayan alanların kalınlığı; toplam üstyapı kalınlığı, kritik üstyapı temel, alt temel ve üstyapı kalınlığının 0,9' u olarak alınır. Kritik ve kritik olmayan banketler için 0,7 katsayısı, sadece temele uygulanır.

Tasarım uçağı kütlesi 45300 kg dan fazla olduğu için, bitümlü temel kullanılmıştır.

Üstyapı Kalınlıkları:

1) Pist, Apron ve Taksiyolu kritik alanlarında;

-5 cm aşınma tabakası

-5 cm Binder tabakası

-30 cm Bitümlü temel

-60 cm Kum-çakıl alt temel

2) Pist, Apron ve Taksiyolu kritik olmayan alanlarında;

-4 cm aşınma tabakası

-4 cm binder tabakası

-27 cm bitümlü temel

-54 cm kum-çakıl alt temel

7.2.2 Rijit Üstyapı Tasarımı

Zaman;

20 yıllık tasarım ömrü esas alınmıştır.

Yük;

Tasarım uçağı brüt ağırlığı = 400 000lb (181440 kg)

Tekerlek Düzeni ve Geometrisi

Seçilen tasarım uçağı çift tandem uçaktır.

Trafik Hacmi;

Yıllık kalkış sayısı: AD1200

Malzeme ve zemin özellikleri;

Zemin sınıfı: E7

Zemin ort. lab CBR: E-7 (%6.6)

Zemin reaksiyon modülü, $k= 100-150 \text{ lb/inç}^3$

Beton Eğilme-Gerilmesi =650 psi, 45kg/cm^2 (Beton sınıfı : C 40/50 Mpa)

1) Proje uçağının kütlesi, stabilize alt temel kullanmayı gerektirmektedir. Alt temel kalınlığı = 15 cm olarak alındığında, Şekil 5.7' den düzeltilmiş k değeri 220 pci (60 MN/ m^3) olarak okunmaktadır.

2) Beton Kaplama kalınlığı Şekil 5.10' dan bulunmaktadır. Beton eğilme gerilmesi 650 psi' den, zemin reaksiyon modülü =220 pci kesiştirilir, buradan brüt uçak kütlesi olan 181440kg değerine çıkılır. Bu değerden, sağ tarafta 1200 kalkış sayısı için verilen beton kaplama kalınlığı değeri okunur. Beton kaplama kalınlığı 16,3 inç =42 cm olarak okunmaktadır.

3) Toplam kalınlık donma indeksinden küçük olduğu için alt temel kalınlığında düzeltme yapılmalıdır. Şekil 5.5' ten 25 inç don-penetrasyon değeri için, alt temel kalınlığı 18 inç= 45 cm olarak okunmaktadır.

4) Kritik olmayan alanların kalınlığı; toplam üstyapı kalınlığının 0,9'u olarak alınır. Kritik ve kritik olmayan banketler için 0,7 katsayısı, sadece temele uygulanır.

Üstyapı Kalınlıkları:

1) Pist, Apron ve Taksiyolu kritik alanlarında;

-42 cm beton plak

-45 cm stabilize alt temel , 87 cm toplam üstyapı kalınlığı

2) Pist, Apron ve Taksiyolu kritik olmayan alanlarında;

-38 cm beton plak

-40 cm stabilize alt temel

78 cm toplam üstyapı kalınlığı

7.3 Karayolu ve Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Tasarım Parametreleri Esas Alınarak Karşılaştırılması

7.3.1 Tasarım Yükü Açısından Karşılaştırma

Karayolu üstyapısı projelendirmesinde, AASHTO 1993 yönteminde olduğu gibi, dingil yükü ve trafik yoğunluğunu temsil etmek üzere 8,2 ton eşdeğer tek dingil yükü tekrar sayısı kullanılmaktadır. Havaalanı üstyapıları ise, FAA yönteminde olduğu gibi, genellikle kritik uçaklar (tasarım uçağı) esas alınarak projelendirilmektedir. Havaalanı üstyapı tasarımında, kritik uçağın brüt ağırlığı yani maksimum kalkış ağırlığı göz önüne alınmaktadır. Karayolu üstyapı tasarımında, taşıt özellikleri açısından sadece tekerlek düzeni önem taşırken, havaalanı üstyapı tasarımında, uçakların tekerlek düzeni, lastik basınçları ve lastik değme alanı gibi özellikleri tasarım yöntemini etkilemektedir. Uçaklarda lastik basıncı 2500-3000 KN/m² iken, genel olarak ağır taşıtlarda 400-600 KN/m² civarında olmaktadır. Havaalanı üstyapı tasarım abaklarında lastik değme alanı dolayısıyla lastik basıncı dikkate alınmıştır. Ancak lastik değme alanı, karayolu üstyapı tasarımında dikkate alınan bir parametre değildir. Uçakların lastik basıncındaki değişim, değme alanını değiştirir ve bu uzun vadede üstyapının deformasyonunu etkilemektedir.

7.3.2 Trafik Hacmi (Yük Tekrar Sayısı) Açısından Karşılaştırma

Karayollarında tasarım ömrü boyunca esas alınan yük tekrar sayısı 10⁶-10⁸ eşdeğer standart tek dingil yükü civarında olmaktadır. Buna karşılık, havaalanı üstyapıları ağır yük taşıyan havaalanları için tasarım ömrü boyunca en fazla 10⁵ ve genellikle 5000-25000 aralığında kalkış sayısı için tasarlanmaktadır. Karayolu esnek üstyapı

tasarımında farklı taşıt grupları tek dingil tipine dönüştürülmekte ve trafik hacmi, “Eşdeğer Standart Dingil Yüku Tekrar Sayısı” ile ifade edilmektedir. Benzer olarak havaalanı üstyapı tasarımında, üstyapıyı kullanacak olan farklı uçak tipleri, seçilen tasarım uçağı tipine dönüştürülerek, trafik hacmi için “Tasarım Uçağının Yıllık Eşdeğer Kalkış Sayısı” esas alınmaktadır. FAA tasarım yönteminde tasarım uçağının yıllık kalkış sayısı trafik hacmi olarak alınarak 20 yıllık tasarım ömrü için hazırlanan tasarım abaklarından üstyapı kalınlığı bulunmaktadır. Asfalt Enstitüsü yönteminde ise, herbir uçak için, 5 yıllık periyotlarla kalkış sayıları belirlenmektedir.

7.3.3 İklim ve Çevresel Etkiler Açısından Karşılaştırma

Karayolu esnek üstyapı tasarımında, AASHTO 1972 yöntemi, iklim ve çevre etkilerini, R bölge faktörü ile hesaba katmakta, AASHTO’nun 1986 ve 1993 yöntemlerinde, iklim ve çevre etkileri, zemin şişmesi ve don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde oluşan kayıp nedeniyle performans periyodunda azaltma yapılması şeklinde hesaba katmaktadır. Asfalt Enstitüsü ve SHELL yöntemlerinde ise, ortalama yıllık hava sıcaklıkları göz önüne alınmaktadır. AASHTO 2002 yöntemi iklim ve çevre etkilerini daha kapsamlı bir şekilde tasarıma katmaktadır. Havaalanı üstyapı tasarımlarında, Mühendisler Kurulu yöntemi donma etkisine karşı koruma tasarımı yapmaktadır. FAA yönteminde ise, don-penetrasyon derinliğine kadar derinliklerde önlem alınması önerilmektedir. Asfalt Enstitüsü, havaalanı üstyapı tasarımı için ortalama yıllık hava sıcaklıklarını dikkate almaktadır.

7.3.4 Taban Zemini Açısından Karşılaştırma

Karayolu esnek üstyapı tasarım yöntemlerinde, zemin dayanımı genellikle zemin CBR değeri ve zemin esneklik modülü (M_R) ile tanımlanmıştır. Havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerinde de benzer şekilde, zemin dayanımını tanımlamak için bu parametreler kullanılmaktadır.

7.3.5 Üstyapı Malzemelerinin Özellikleri Açısından Karşılaştırma

Karayolu esnek üstyapı tasarımında, üstyapı tabakalarının malzeme özellikleri, kullanılacak malzemenin esneklik modülü (M_R), elastisite modülü (E) veya izafi mukavemet katsayıları ile tanımlanmaktadır. AASHTO 1972, 1986 ve 1993

yöntemlerinde üstyapı tabakalarının malzeme özellikleri, izafi mukavemet katsayıları ile elastisite modüllerine bağlı olarak alınmaktadır. AASHTO 2002 yönteminde ise, esneklik modülleri hesaba katılmış, ayrıca malzeme özellikleri daha ayrıntılı bir şekilde tasarıma eklenmiştir. Analitik tasarım yöntemi olan, SHELL esnek üstyapı tasarım yöntemi, üstyapı tabakalarının malzeme özelliklerini, kaplama tabakası için asfalt karışımının rijitlik modülü ile diğer tabakalar için dinamik elastisite modülleri ile hesaba katmaktadır. Havaalanı esnek üstyapı tasarımında ise, üstyapı tabakalarının malzeme özellikleri için, ampirik yöntemler (FAA ve Mühendisler Kurulu) malzemelerin CBR değerlerini dikkate almaktadır. Asfalt Enstitüsü yönteminde ise, alttemel ve asfalt betonu tabakasının özellikleri, elastisite modülü ve poisson oranı ile tanımlanmaktadır.

7.3.6 Trafik Alanına Bağlı Üstyapı Kalınlığı Açısından Karşılaştırma

Karayolu için hesaplanan üstyapı tabaka kalınlıkları, yol boyunca, zemin özelliklerinin çok değişkenlik göstermemesi halinde sabittir. Yol güzergahının farklı bölgelerinde, zemin dayanımının değişkenlik göstermesi ile sadece alt temel tabakasının kalınlığında değişiklik yapılmaktadır. Havaalanı üstyapı tasarımında ise, pist, apron ve taksiyolu kritik alanlarında, pist, apron ve taksiyollarının kritik olmayan alanlarında, banket alanlarında farklı kalınlıklarda tasarlanmaktadır. Mühendisler Kurulu tarafından tanımlanan trafik alanları Şekil 4.3' te verilmiştir.

7.4 Karayolu ve Havaalanı Rijit Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Tasarım Parametreleri Esas Alınarak Karşılaştırılması

Karayolu ve havaalanı esnek üstyapı tasarım yöntemlerinin, tasarım yükü açısından, trafik hacmi (yük tekrar sayısı) açısından, iklim ve çevresel etkiler açısından ve trafik alanına bağlı üstyapı kalınlığı açısından karşılaştırılması rijit üstyapı tasarımı yöntemleri için de aynıdır.

7.4.1 Taban Zemini Açısından Karşılaştırma

Hem karayolu, hem havaalanı rijit üstyapı tasarım yöntemlerinde, zemin dayanımı, zemin reaksiyon modülü ($k-pci$) ile tanımlanmıştır.

7.4.2 Üstyapı Malzemelerinin Özellikleri Açısından Karşılaştırma

Hem karayolu hem havaalanı rijit üstyapı tasarım yöntemlerinde beton plak malzemesinin özellikleri, betonun eğilme-çekme gerilmesi ya da kopma modülü ile hesaba katılmaktadır.

7.4.3 Pompaj Olayı Açısından Karşılaştırma

Karayolu rijit üstyapısının tasarım ömrü boyunca performansı ile havaalanı rijit üstyapısının tasarım ömrü boyunca performansı farklılık göstermektedir. Yüksek hacimli trafik taşıyan karayolu rijit üstyapıları killi taban zemini üzerine inşa edildiğinde, genellikle pompaj olayı meydana gelmektedir. Diğer taraftan, plastik zemin üzerine inşa edilen havaalanı üstyapılarında pompaj olayı nadiren görülmektedir.

7.4.4 Üstyapı Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karşılaştırma

Havaalanı rijit üstyapı tasarımında yüzey pürüzlülüğü, güvenlik açısından dikkate alınan bir parametredir. Tasarım ömrü boyunca, havaalanı üstyapısının gerekli yüzey pürüzlülüğü sağlanmaktadır. Karayolu üstyapıları için yüzey pürüzlülüğü dikkate alınan bir parametre değildir.

Ancak, yüzey pürüzlülüğünün dikkate alınmaması, önemsiz olduğu anlamına gelmemektedir. Aksine, bu parametrenin güvenlik açısından çok önemli olması nedeniyle, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin belirli aralıklarla yapılması gereklidir. Ayrıca, bu parametre ile ilgili şartnamelerin mevcut olması ve ölçüm değerlerinin şartname değerleri ile karşılaştırılması gerekli ve uygundur.

8. SONUÇLAR

Karayolu ve havaalanı üstyapılarının tasarımı, üstyapı tipinin seçimi, tabaka kalınlıklarının hesaplanması ve kullanılacak malzemelerin seçiminin yapılması ile ilgili esasları kapsamaktadır. Üstyapı tipinin seçimi, üstyapının fonksiyonel kullanımı (proje hızı ve güvenlik gereklilikleri) na, trafik yükü tipine, inşa maliyetine ve üstyapı bakım gerekliliklerine bağlı olmaktadır.

Tüm üstyapı tasarım yöntemleri, taban zemini ve üstyapı tabakalarının dayanımı, malzeme özelliklerini, yük ve trafik kompozisyonunu, çevresel koşulları ve tasarım ve yapım ekonomisi gibi faktörleri esas almaktadır. Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında dikkate alınan belli başlı parametreler aynı olmakla birlikte, her bir parametrenin niceliği farklılık göstermektedir.

Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımı arasındaki farklardan en önemlisi, tasarımda esas alınan yük tekrarlarının sayısıdır. Yük tekrar sayısı karayollarında büyük oranda üstyapı tasarımı yapılacak yolun tipine bağlıdır. Örneğin tali yollar günde 100 araçtan az taşıyabilirken, buna karşılık, anayollar günde 25000 araca kadar trafik taşıyabilmektedir. Bununla birlikte, bu araç sayısının büyük bir kısmı üstyapı tasarım ömrünü çok etkilemeyen otomobil ve hafif yük araçları olmaktadır. Karayollarında tasarım ömrü boyunca esas alınan yük tekrar sayısı 10^7 - 10^8 eşdeğer standart tek dingil yükü civarında olmaktadır. Buna karşılık, havaalanı üstyapıları ağır yük taşıyan havaalanları için tasarım ömrü boyunca en fazla 10^5 ve genellikle 5000-25000 aralığında kalkış sayısı için tasarlanmaktadır.

Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında kullanılan tasarım yükleri de farklı olmaktadır. Karayolu üstyapısı projelendirme esası, dingil yükü ve trafik yoğunluğunu temsil etmek üzere, 8,2 ton eşdeğer tek dingil yükü tekrar sayısını kullanmaktadır. Havaalanı üstyapıları ise, genellikle kritik uçaklar esas alınarak projelendirilmektedir.

Verilen dingil yükü ve lastik basıncı için, üstyapı tasarımı yapıldığında yük tekrar sayısından dolayı karayolu üstyapısı kalınlığı havaalanı üstyapısının kalınlığından fazla bulunur. Ancak bu, karayolu üstyapı kalınlığının, havaalanı üstyapı kalınlığından fazla olduğu anlamına gelmez. Havaalanlarındaki brüt yükler karayollarındakine oranla çok daha büyük olduğu için, havaalanı üstyapı kalınlıkları daha fazla olmaktadır.

Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemlerinde, iklim ve çevre etkilerinin, genellikle zemin şişmesi ve don kabarması, ortalama yıllık hava sıcaklıkları şeklinde tasarımda dikkate alınması benzer şekildedir.

Taban zemininin tasarımda yer alması açısından değerlendirildiğinde, genel olarak havaalanı ve karayolu üstyapı tasarımında bir farklılık olmamaktadır. Ancak zemin dayanımı esnek ve rijit üstyapı tasarımı için farklılık oluşturan bir parametredir. Hem karayolu hem havaalanı esnek üstyapıları için zemin dayanımı, esneklik modülü veya CBR değeri ile ifade edilirken, karayolu ve havaalanı rijit üstyapı tasarımlarında taban zemini yatak katsayısı (zemin reaksiyon modülü) ile ifade edilmektedir.

Üstyapı malzeme özelliklerinin tasarımdaki etkisi değerlendirildiğinde, hem havaalanı, hem de karayolu üstyapı tasarımlarında, esnek üstyapı tasarımı için üstyapı malzemelerinin özellikleri, malzemelerin elastisite modülleri, esneklik modülleri, CBR değerleri veya izafi mukavemet katsayısı gibi parametreler ile ifade edilmektedir. Rijit üstyapı tasarımında ise, hem havaalanı hem karayolu için, beton plağın eğilmede çekme gerilmesi ya da kopma modülü esas alınmaktadır.

Tasarım ömrü boyunca, karayolu rijit üstyapısının performansı ile havaalanı rijit üstyapısının performansı farklılık göstermektedir. Karayolu rijit üstyapılarında genellikle pompaj olayı meydana gelirken, havaalanı üstyapılarında pompaj olayı nadiren görülmektedir.

Havaalanı rijit üstyapı tasarımında, tasarım ömrü boyunca gereken yüzey pürüzlülüğünün sağlanması önem taşımaktadır. Belirli aralıklarla pürüzlülük ölçümleri yapılmaktadır. Karayolu rijit üstyapı tasarımında, yüzey pürüzlülüğü bu

şekilde dikkate alınmamaktadır. Ancak, bu parametrenin güvenlik açısından çok önemli olması nedeniyle, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin, hem karayolu için hem havaalanları için, belirli aralıklarla yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

- [1] Ağar, E., Umar, F., 1991. Yol Üstyapısı, İTÜ Ulaştırma Anabilim Dalı
- [2] Whiteoak, D., ed. Lav, A. H. , Lav, A., 2004, Shell Bitüm Elkitabı, İsfalt, İstanbul
- [3] “AASHTO Interim Guide For Design of Pavement Structures”, 1972, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [4] “The AASHTO Road Test: Report 5- Pavment Research”, 1962, Highway Research Board Special Report 61E.
- [5] Yoder, E., J., Witzak, M., W., 1975, Principles of Pavement Design, John Wiley&Sons, New York
- [6] “AASHTO Interim Guide For Design of Pavement Structures”, 1993, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [7] “Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi”, 2006, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara
- [8] Utah State Department of Highways, “ Manual Of Instructions, Part 8: Materials,” 1966, Utah State Department Of Highways.
- [9] Utah Department of Highways, Materials And Test Division, “The Repeatability Of Test Result Using Various California Bearing Ratio Procedures and the Resistance R-Value,” August,1967, Utah Research Report 500-908, Utah Project HPR-1 (5).
- [10] Van Til, C. J., “Evaluation Of AASHTO Interim Guides for Design of Pavement Structures,” 1972, NCHRP 128, Washington, D.C.
- [11] Avcı S., 2006, Esnek Üstyapı tasarım Yöntemlerinden AASHTO 2002 ile AASHTO 1993 Yönteminin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [12] **Tunç, A.**, Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, 2004, Asil Yayın Dağıtım İtd.Şti.
- [13] **Dündar, G.**, 1998, Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Calessen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P., Uge, P.**, 1977 , Asphalt Pavement Design: The Shell Method, Paper Prepared For The 4th International Conference On The Structural Design Of Asphalt Pavements, University Of Michigan, Ann Arbor, USA 21-26 August.
- [15] **Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G.**, 1998, Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [16] **Portland Cement Association**, “ Thickness Design for Concrete Pavement”, 1966, Portland Cement Association.
- [17] **Ashford, N., Wright, P.,H.**, Airport Engineering, 1992, John Wiley&Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- [18] **Bingöl, G.**, 2000, Havaalanı Üstyapılarının Tasarımı ve İyileştirilmesi Yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Aerodrome Design Manual**, 1983, DOC. 9157, AN/907 Part 3, Pavements, Second Edition, ICAO.
- [20] **Horonjeff, R., McKelvey, F., X.**, Planning and Design of Airports, 1994, McGraw-Hill, New York, San Francisco, Washington.
- [21] **Development of CBR Flexible Pavement Design Methods For Airfields**, Symposium Transactions, Vol.115, American Society Of Civil Engineers, 1950
- [22] **Brown, D.N., And Rice, J. L.**, Airfield Pavement Requirements For Multiple-Wheel Heavy Gear Loads. U.S.A. Waterways Experiment Station Report, FAA-RD-70-77, Federal Aviation Administration, Washington, D.C.,1971
- [23] **Corps Of Engineers**, Engineering And Design- Flexible Pavements, EM-1110-45-302,1958
- [24] **Corps Of Engineers**, Pavement Design For Frost Conditions, EM-1110-45-302,1958
- [25] **Department of Transportation**, Federal Aviation Administration, “Airport Paving,” Washington,D.C (A) AC 150/5320-6, 1964; (B) AC 150/5320-6A, 1967; (C) AC 150/5320-1970; (D) AC 150/5320-6B, 1974.
- [26] **The Asphalt Institute**, Full Depth Asphalt Pavement For General Aviation, Information series No. 154 (IS-154), College park, Maryland, 1973.
- [27] **The Asphalt Institute**, “Computer Program Supplement to Full-Depth Asphalt Pavements For Air Carrier Airports,” Manual Series No. 11A(MS-11A), College Park, Maryland, 1973.

- [28] **The Asphalt Institute**, “Full-Depth Asphalt Pavements For Air Carrier Airports,” Manual Series No. 11(MS-11) College Park, Maryland, 1973
- [29] **Kingham, R. I.**, “ Failure Criteria Developed from AASHTO Road Test Data,” *Proceedings*, Third International Conference On The Structural Design Of Asphalt Pavements, London, England, 1972
- [30] **Witzack, M. W.**, “ Design of Full-Depth Asphalt Airfield Pavements,” *Proceedings*, Third International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, London, England, 1972
- [31] **Packard, Robert G.**, “Computer Program for Airport Pavement Design,” Portland Cement Association, 1967
- [32] **Packard, Robert G.**, “ Design Of Concrete Airport Pavement,” Portland Cement Association, 1995
- [33] **Karayolları Genel Müdürlüğü, 14 Bölge Müdürlüğü**, ‘Bursa-Eskişehir- (İnegöl- Bozüyük Arası) Yolu Km: 47+456-100+225 Arasına Ait Üstyapı Dizayn Raporu’ 2003.
- [34] **T.C Ulaştırma Bakanlığı, Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü**, ‘Elazığ Havaalanı Kaplama Kalınlıkları Raporu’ , 2007.
- [35] **Packard, Robert G.**, “ Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements,” Portland Cement Association, 1995
- [36] **Fwa, T.F.**, **The Civil Engineering Handbook**, Highway and Airport Pavement Design , National University of Singapore, USA, 2003.
- [37] **Flexible Pavement Design Manual**, Florida Department of Transportation, Pavement Management Office, 2002.

EK-1

Tablo 1.1: Esnek Üstyaplarda Tek Dingil ve $P_t = 2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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 1.2: Esnek Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_t=2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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 1.3: Esnek Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_t=2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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 1.4: Esnek Üstyapılarda Tek Dingil ve $P_f=2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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	18.10	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 1.5: Esnek Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_t = 2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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	1.75	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	5.01	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 1.6: Esnek Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_f=2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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 1.7: Esnek Üstyapılarda Tek Dingil ve $P_f= 3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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	11.90	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 1.8: Esnek Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_t= 3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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 1.9: Esnek Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_f = 3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (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

Tablo 1.10: Rijit Üstyapılarda Tek Dingil ve $P_T = 2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlıkları d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
8	0,035	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
10	0,087	0,084	0,082	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
12	0,186	0,180	0,176	0,175	0,174	0,174	0,173	0,173	0,173
14	0,353	0,346	0,341	0,338	0,337	0,336	0,336	0,336	0,336
16	0,614	0,609	0,604	0,601	0,599	0,599	0,598	0,598	0,598
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,55	1,56	1,57	1,58	1,58	1,59	1,59	1,59	1,59
22	2,32	2,32	2,35	2,38	2,40	2,41	2,41	2,41	2,42
24	3,37	3,34	3,40	3,47	3,51	3,53	3,54	3,55	3,55
26	4,76	4,69	4,77	4,88	4,97	5,02	5,04	5,06	5,06
28	6,58	6,44	6,52	6,70	6,85	6,94	7,00	7,02	7,04
30	8,92	8,68	8,74	8,98	9,23	9,39	9,48	9,54	9,56
32	11,9	11,5	11,5	11,8	12,2	12,4	12,6	12,7	12,7
34	15,5	15,0	14,9	15,3	15,8	16,2	16,4	16,6	16,7
36	20,1	19,3	19,2	19,5	20,1	20,7	21,1	21,4	21,5
38	25,6	24,5	24,3	24,6	25,4	26,1	26,7	27,1	27,4
40	32,2	30,8	30,4	30,7	31,6	32,6	33,4	34,0	34,4
42	40,1	38,4	37,7	38,0	38,9	40,1	41,3	42,1	42,7
44	49,4	47,3	46,4	46,6	47,6	49,0	50,4	51,6	52,4
46	60,4	57,7	56,6	56,7	57,7	59,3	61,1	62,6	63,7
48	73,2	69,9	68,4	68,4	69,4	71,2	73,3	75,3	76,8
50	88,0	84,1	82,2	82,0	83,0	84,9	87,4	89,8	91,7

(Not : 1 Kip = 1000 libre = 453 kg; 1 inç = 2,54 cm)

Tablo 1.11: Rijit Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_t=2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
6	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
8	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
10	0,014	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
12	0,028	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
14	0,051	0,049	0,048	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
16	0,087	0,084	0,082	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080
18	0,141	0,136	0,133	0,132	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
20	0,216	0,210	0,206	0,204	0,203	0,203	0,203	0,203	0,203
22	0,319	0,313	0,307	0,305	0,304	0,303	0,303	0,303	0,303
24	0,454	0,449	0,444	0,441	0,440	0,439	0,439	0,439	0,439
26	0,629	0,626	0,622	0,620	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618
28	0,852	0,851	0,850	0,850	0,850	0,849	0,849	0,849	0,849
30	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
32	1,48	1,48	1,49	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
34	1,90	1,90	1,93	1,95	1,96	1,97	1,97	1,97	1,97
36	2,42	2,41	2,45	2,49	2,51	2,53	2,53	2,53	2,53
38	3,04	3,02	3,07	3,13	3,17	3,19	3,20	3,20	3,21
40	3,79	3,74	3,80	3,89	3,95	3,98	4,00	4,01	4,01
42	4,67	4,59	4,66	4,78	4,87	4,93	4,95	4,97	4,97
44	5,72	5,59	5,67	5,82	5,95	6,03	6,07	6,09	6,10
46	6,94	6,76	6,83	7,02	7,20	7,31	7,37	7,41	7,43
48	8,36	8,12	8,17	8,40	8,63	8,79	8,88	8,93	8,96
50	10,0	9,69	9,72	9,98	10,27	10,49	10,62	10,69	10,73
52	11,9	11,5	11,5	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,8
54	14,0	13,5	13,5	13,8	14,2	14,6	14,9	15,0	15,1
56	16,5	15,9	15,8	16,1	16,6	17,1	17,4	17,6	17,7
58	19,3	18,5	18,4	18,7	19,3	19,8	20,3	20,5	20,7
60	22,4	21,5	21,3	21,6	22,3	22,9	23,5	23,8	24,0
62	25,9	24,9	24,6	24,9	25,6	26,4	27,0	27,5	27,7
64	29,9	28,6	28,2	28,5	29,3	30,2	31,0	31,6	31,9
66	34,3	32,8	32,3	32,6	33,4	34,4	35,4	36,1	36,5
68	39,2	37,5	36,8	37,1	37,9	39,1	40,2	41,1	41,6
70	44,6	42,7	41,9	42,1	42,9	44,2	45,5	46,6	47,3
72	50,6	48,4	47,5	47,6	48,5	49,9	51,4	52,6	53,5
74	57,3	54,7	53,6	53,6	54,6	56,1	57,7	59,2	60,3
76	64,6	61,7	60,4	60,3	61,2	62,8	64,7	66,4	67,7
78	72,5	69,3	67,8	67,7	68,6	70,2	72,3	74,3	75,8
80	81,3	77,6	75,9	75,7	76,6	78,3	80,6	82,8	84,7
82	90,9	86,7	84,7	84,4	85,3	87,1	89,6	92,1	94,2
84	101,0	97,0	94,0	94,0	95,0	97,0	99,0	102,0	105,0
86	113,0	107,0	105,0	104,0	105,0	107,0	110,0	113,0	116,0
88	125,0	119,0	116,0	116,0	116,0	118,0	121,0	125,0	128,0
90	138,0	132,0	129,0	128,0	129,0	131,0	134,0	137,0	141,0

(Not : 1 Kip = 1000 libre = 453 kg; 1 inç = 2,54 cm)

Tablo 1.12: Rijit Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_t = 2.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
6	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009
8	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
12	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
14	0,018	0,017	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
16	0,030	0,029	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
18	0,047	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
20	0,072	0,069	0,067	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
22	0,105	0,101	0,099	0,098	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
24	0,149	0,144	0,141	0,139	0,139	0,138	0,138	0,138	0,138
26	0,205	0,199	0,195	0,194	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192
28	0,276	0,270	0,265	0,263	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262
30	0,364	0,359	0,354	0,351	0,350	0,349	0,349	0,349	0,349
32	0,472	0,468	0,463	0,460	0,459	0,458	0,458	0,458	0,458
34	0,603	0,600	0,596	0,594	0,593	0,592	0,592	0,592	0,592
36	0,759	0,758	0,757	0,756	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755
38	0,946	0,947	0,949	0,950	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951
40	1,17	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,19
42	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
44	1,71	1,73	1,75	1,77	1,78	1,78	1,79	1,79	1,79
46	2,08	2,07	2,10	2,13	2,15	2,16	2,16	2,16	2,17
48	2,48	2,47	2,51	2,55	2,58	2,59	2,60	2,60	2,61
50	2,95	2,92	2,97	3,03	3,07	3,09	3,10	3,11	3,11
52	3,48	3,44	3,50	3,58	3,63	3,66	3,68	3,69	3,69
54	4,09	4,03	4,09	4,20	4,27	4,31	4,33	4,35	4,35
56	4,78	4,69	4,76	4,89	4,99	5,05	5,08	5,09	5,10
58	5,57	5,44	5,51	5,66	5,79	5,87	5,91	5,94	5,95
60	6,45	6,29	6,35	6,51	6,69	6,79	6,85	6,88	6,90
62	7,43	7,23	7,28	7,49	7,69	7,82	7,90	7,94	7,97
64	8,54	8,28	8,32	8,55	8,80	8,97	9,07	9,13	9,16
66	9,76	9,46	9,48	9,73	10,02	10,24	10,37	10,44	10,48
68	11,1	10,8	10,8	11,0	11,4	11,6	11,8	11,9	12,0
70	12,6	12,2	12,2	12,5	12,8	13,2	13,4	13,5	13,6
72	14,3	13,8	13,7	14,0	14,5	14,9	15,1	15,3	15,4
74	16,1	15,5	15,4	15,7	16,2	16,7	17,0	17,2	17,3
76	18,2	17,5	17,3	17,6	18,2	18,7	19,1	19,3	19,5
78	20,4	19,6	19,4	19,7	20,3	20,9	21,4	21,7	21,8
80	22,8	21,9	21,6	21,9	22,6	23,3	23,8	24,2	24,4
82	25,4	24,4	24,1	24,4	25,0	25,8	26,5	26,9	27,2
84	28,3	27,1	26,7	27,0	27,7	28,6	29,4	29,9	30,2
86	31,4	30,1	29,6	29,9	30,7	31,6	32,5	33,1	33,5
88	34,8	33,3	32,8	33,0	33,8	34,8	35,8	36,6	37,1
90	38,5	36,8	36,2	36,4	37,2	38,3	39,4	40,3	40,9

Tablo 1.13: Rijit Üstyaplarda Tek Dingil ve $P_t = 2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,012	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
8	0,039	0,035	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
10	0,097	0,089	0,084	0,082	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080
12	0,203	0,189	0,181	0,176	0,175	0,174	0,174	0,173	0,173
14	0,376	0,360	0,347	0,341	0,338	0,337	0,336	0,336	0,336
16	0,634	0,623	0,610	0,604	0,601	0,599	0,599	0,599	0,598
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,51	1,52	1,55	1,57	1,58	1,58	1,59	1,59	1,59
22	2,21	2,20	2,28	2,34	2,38	2,40	2,41	2,41	2,41
24	3,16	3,10	3,22	3,36	3,45	3,50	3,53	3,54	3,55
26	4,41	4,26	4,42	4,67	4,85	4,95	5,01	5,04	5,05
28	6,05	5,76	5,92	6,29	6,61	6,81	6,92	6,98	7,01
30	8,16	7,67	7,79	8,28	8,79	9,14	9,35	9,46	9,52
32	10,8	10,1	10,1	10,7	11,4	12,0	12,3	12,6	12,7
34	14,1	13,0	12,9	13,6	14,6	15,4	16,0	16,4	16,5
36	18,2	16,7	16,4	17,1	18,3	19,5	20,4	21,0	21,3
38	23,1	21,1	20,6	21,3	22,7	24,3	25,6	26,4	27,0
40	29,1	26,5	25,7	26,3	27,9	29,9	31,6	32,9	33,7
42	36,2	32,9	31,7	32,2	34,0	36,3	38,7	40,4	41,6
44	44,6	40,4	38,8	39,2	41,0	43,8	46,7	49,1	50,8
46	54,5	49,3	47,1	47,3	49,2	52,3	55,9	59,0	61,4
48	66,1	59,7	56,9	56,8	58,7	62,1	66,3	70,3	73,4
50	79,4	71,7	68,2	67,8	69,6	73,3	78,1	83,0	87,1

Tablo 1.14: Rijit Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_t=2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
6	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
8	0,007	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
10	0,015	0,014	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
12	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
14	0,057	0,052	0,049	0,048	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
16	0,097	0,089	0,084	0,082	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080
18	0,155	0,143	0,136	0,133	0,132	0,131	0,131	0,131	0,131
20	0,234	0,220	0,211	0,206	0,204	0,203	0,203	0,203	0,203
22	0,340	0,325	0,313	0,308	0,305	0,304	0,303	0,303	0,303
24	0,475	0,462	0,450	0,444	0,441	0,440	0,439	0,439	0,439
26	0,644	0,637	0,627	0,622	0,620	0,619	0,618	0,618	0,618
28	0,855	0,854	0,852	0,850	0,850	0,850	0,849	0,849	0,849
30	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
32	1,43	1,44	1,47	1,49	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51
34	1,82	1,82	1,87	1,92	1,95	1,96	1,97	1,97	1,97
36	2,29	2,27	2,35	2,43	2,48	2,51	2,52	2,52	2,53
38	2,85	2,80	2,91	3,03	3,12	3,16	3,18	3,20	3,20
40	3,52	3,42	3,55	3,74	3,87	3,94	3,98	4,00	4,01
42	4,32	4,16	4,30	4,55	4,74	4,86	4,91	4,95	4,96
44	5,26	5,01	5,16	5,48	5,75	5,92	6,01	6,06	6,09
46	6,36	6,01	6,14	6,53	6,90	7,14	7,28	7,36	7,40
48	7,64	7,16	7,27	7,73	8,21	8,55	8,75	8,86	8,92
50	9,11	8,50	8,55	9,07	9,68	10,14	10,42	10,58	10,66
52	10,8	10,0	10,0	10,6	11,3	11,9	12,3	12,5	12,7
54	12,8	11,8	11,7	12,3	13,2	13,9	14,5	14,8	14,9
56	15,0	13,8	13,6	14,2	15,2	16,2	16,8	17,3	17,5
58	17,5	16,0	15,7	16,3	17,5	18,6	19,5	20,1	20,4
60	20,3	18,5	18,1	18,7	20,0	21,4	22,5	23,2	23,6
62	23,5	21,4	20,8	21,4	22,8	24,4	25,7	26,7	27,3
64	27,0	24,6	23,8	24,4	25,8	27,7	29,3	30,5	31,3
66	31,0	28,1	27,1	27,6	29,2	31,3	33,2	34,7	35,7
68	35,4	32,1	30,9	31,3	32,9	35,2	37,5	39,3	40,5
70	40,3	36,5	35,0	35,3	37,0	39,5	42,1	44,3	45,9
72	45,7	41,4	39,6	39,8	41,5	44,2	47,2	49,8	51,7
74	51,7	46,7	44,6	44,7	46,4	49,3	52,7	55,7	58,0
76	58,3	52,6	50,2	50,1	51,8	54,9	58,6	62,1	64,8
78	65,5	59,1	56,3	56,1	57,7	60,9	65,0	69,0	72,3
80	73,4	66,2	62,9	62,5	64,2	67,5	71,9	76,4	80,2
82	82,0	73,9	70,2	69,6	71,2	74,7	79,4	84,4	88,8
84	91,4	82,4	78,1	77,3	78,9	82,4	87,4	93,0	98,1
86	102,0	92,0	87,0	86,0	87,0	91,0	96,0	102,0	108,0
88	113,0	102,0	96,0	95,0	96,0	100,0	105,0	112,0	119,0
90	125,0	112,0	106,0	105,0	106,0	110,0	115,0	123,0	130,0

Tablo 1.15: Rijit Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_t=2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
8	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
12	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
14	0,020	0,018	0,017	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
16	0,033	0,030	0,029	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
18	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043
20	0,080	0,073	0,069	0,067	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
22	0,116	0,107	0,101	0,099	0,098	0,097	0,097	0,097	0,097
24	0,163	0,151	0,144	0,141	0,139	0,139	0,138	0,138	0,138
26	0,222	0,209	0,200	0,195	0,194	0,193	0,192	0,192	0,192
28	0,295	0,281	0,271	0,265	0,263	0,262	0,262	0,262	0,262
30	0,384	0,371	0,359	0,354	0,351	0,350	0,349	0,349	0,349
32	0,490	0,480	0,468	0,463	0,460	0,459	0,458	0,458	0,458
34	0,616	0,609	0,601	0,596	0,594	0,593	0,592	0,592	0,592
36	0,765	0,762	0,759	0,757	0,756	0,755	0,755	0,755	0,755
38	0,939	0,941	0,946	0,948	0,950	0,951	0,951	0,951	0,951
40	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
42	1,38	1,38	1,41	1,44	1,45	1,46	1,46	1,46	1,46
44	1,65	1,65	1,70	1,74	1,77	1,78	1,78	1,78	1,79
46	1,97	1,96	2,03	2,09	2,13	2,15	2,16	2,16	2,16
48	2,34	2,31	2,40	2,49	2,55	2,58	2,59	2,60	2,60
50	2,76	2,71	2,81	2,94	3,02	3,07	3,09	3,10	3,11
52	3,24	3,15	3,27	3,44	3,56	3,62	3,66	3,68	3,68
54	3,79	3,66	3,79	4,00	4,16	4,26	4,30	4,33	4,34
56	4,41	4,23	4,37	4,63	4,84	4,97	5,03	5,07	5,09
58	5,12	4,87	5,00	5,32	5,59	5,76	5,85	5,90	5,93
60	5,91	5,59	5,71	6,08	6,42	6,64	6,77	6,84	6,87
62	6,80	6,39	6,50	6,91	7,33	7,62	7,79	7,88	7,93
64	7,79	7,29	7,37	7,82	8,33	8,70	8,92	9,04	9,11
66	8,90	8,28	8,33	8,83	9,42	9,88	10,17	10,33	10,42
68	10,1	9,40	9,40	9,90	10,6	11,2	11,5	11,7	11,9
70	11,5	10,6	10,6	11,1	11,9	12,6	13,0	13,3	13,5
72	13,0	12,0	11,8	12,4	13,3	14,1	14,7	15,0	15,2
74	14,6	13,5	13,2	13,8	14,8	15,8	16,5	16,9	17,1
76	16,5	15,1	14,8	15,4	16,5	17,6	18,4	18,9	19,2
78	18,5	16,9	16,5	17,1	18,2	19,5	20,5	21,1	21,5
80	20,6	18,8	18,3	18,9	20,2	21,6	22,7	23,5	24,0
82	23,0	21,0	20,3	20,9	22,2	23,8	25,2	26,1	26,7
84	25,6	23,3	22,5	23,1	24,5	26,2	27,8	28,9	29,6
86	28,4	25,8	24,9	25,4	26,9	28,8	30,5	31,9	32,8
88	31,5	28,6	27,5	27,9	29,4	31,5	33,5	35,1	36,1
90	34,8	31,5	30,3	30,7	32,2	34,4	36,7	38,5	39,8

Tablo 1.16: Rijit Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_t=2.5$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
8	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
12	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
14	0,020	0,018	0,017	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
16	0,033	0,030	0,029	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
18	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
20	0,080	0,073	0,069	0,067	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
22	0,116	0,107	0,101	0,099	0,098	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
24	0,163	0,151	0,144	0,141	0,139	0,139	0,138	0,138	0,138	0,138
26	0,222	0,209	0,200	0,195	0,194	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192
28	0,295	0,281	0,271	0,265	0,263	0,262	0,262	0,262	0,262	0,262
30	0,384	0,371	0,359	0,354	0,351	0,350	0,349	0,349	0,349	0,349
32	0,490	0,480	0,468	0,463	0,460	0,459	0,458	0,458	0,458	0,458
34	0,616	0,609	0,601	0,596	0,594	0,593	0,592	0,592	0,592	0,592
36	0,765	0,762	0,759	0,757	0,756	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755
38	0,939	0,941	0,946	0,948	0,950	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951
40	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
42	1,38	1,38	1,41	1,44	1,45	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
44	1,65	1,65	1,70	1,74	1,77	1,78	1,78	1,78	1,78	1,79
46	1,97	1,96	2,03	2,09	2,13	2,15	2,16	2,16	2,16	2,16
48	2,34	2,31	2,40	2,49	2,55	2,58	2,59	2,60	2,60	2,60
50	2,76	2,71	2,81	2,94	3,02	3,07	3,09	3,10	3,11	3,11
52	3,24	3,15	3,27	3,44	3,56	3,62	3,66	3,68	3,68	3,68
54	3,79	3,66	3,79	4,00	4,16	4,26	4,30	4,33	4,34	4,34
56	4,41	4,23	4,37	4,63	4,84	4,97	5,03	5,07	5,09	5,09
58	5,12	4,87	5,00	5,32	5,59	5,76	5,85	5,90	5,93	5,93
60	5,91	5,59	5,71	6,08	6,42	6,64	6,77	6,84	6,87	6,87
62	6,80	6,39	6,50	6,91	7,33	7,62	7,79	7,88	7,93	7,93
64	7,79	7,29	7,37	7,82	8,33	8,70	8,92	9,04	9,11	9,11
66	8,90	8,28	8,33	8,83	9,42	9,88	10,17	10,33	10,42	10,42
68	10,1	9,40	9,40	9,90	10,6	11,2	11,5	11,7	11,9	11,9
70	11,5	10,6	10,6	11,1	11,9	12,6	13,0	13,3	13,5	13,5
72	13,0	12,0	11,8	12,4	13,3	14,1	14,7	15,0	15,2	15,2
74	14,6	13,5	13,2	13,8	14,8	15,8	16,5	16,9	17,1	17,1
76	16,5	15,1	14,8	15,4	16,5	17,6	18,4	18,9	19,2	19,2
78	18,5	16,9	16,5	17,1	18,2	19,5	20,5	21,1	21,5	21,5
80	20,6	18,8	18,3	18,9	20,2	21,6	22,7	23,5	24,0	24,0
82	23,0	21,0	20,3	20,9	22,2	23,8	25,2	26,1	26,7	26,7
84	25,6	23,3	22,5	23,1	24,5	26,2	27,8	28,9	29,6	29,6
86	28,4	25,8	24,9	25,4	26,9	28,8	30,5	31,9	32,8	32,8
88	31,5	28,6	27,5	27,9	29,4	31,5	33,5	35,1	36,1	36,1
90	34,8	31,5	30,3	30,7	32,2	34,4	36,7	38,5	39,8	39,8

Tablo 1.17: Rijit Üstyapılarda Tek Dingil ve $P_t= 3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,014	0,012	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
8	0,045	0,038	0,034	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
10	0,111	0,095	0,087	0,083	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080
12	0,228	0,202	0,186	0,179	0,176	0,174	0,174	0,174	0,173
14	0,408	0,378	0,355	0,344	0,340	0,337	0,337	0,336	0,336
16	0,660	0,640	0,619	0,608	0,603	0,600	0,599	0,599	0,599
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,46	1,47	1,52	1,55	1,57	1,58	1,58	1,59	1,59
22	2,07	2,06	2,18	2,29	2,35	2,38	2,40	2,41	2,41
24	2,90	2,81	3,00	3,23	3,38	3,47	3,51	3,53	3,54
26	4,00	3,77	4,01	4,40	4,70	4,87	4,96	5,01	5,04
28	5,43	4,99	5,23	5,80	6,31	6,65	6,83	6,93	6,98
30	7,27	6,53	6,72	7,46	8,25	8,83	9,17	9,36	9,46
32	9,59	8,47	8,53	9,42	10,54	11,44	12,03	12,37	12,56
34	12,5	10,9	10,7	11,7	13,2	14,5	15,5	16,0	16,4
36	16,0	13,8	13,4	14,4	16,2	18,1	19,5	20,4	21,0
38	20,4	17,4	16,7	17,7	19,8	22,2	24,2	25,6	26,4
40	25,6	21,8	20,6	21,5	23,8	26,8	29,5	31,5	32,9
42	31,8	26,9	25,3	26,0	28,5	32,0	35,5	38,4	40,3
44	39,2	33,1	30,8	31,3	33,9	37,9	42,3	46,1	48,8
46	47,8	40,3	37,2	37,5	40,1	44,5	49,8	54,7	58,5
48	57,9	48,6	44,8	44,7	47,3	52,1	58,2	64,3	69,4
50	69,6	58,4	53,6	53,1	55,6	60,6	67,6	75,0	81,4

Tablo 1.17: Rijit Üstyapılarda Tandem Dingil ve $P_T=3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

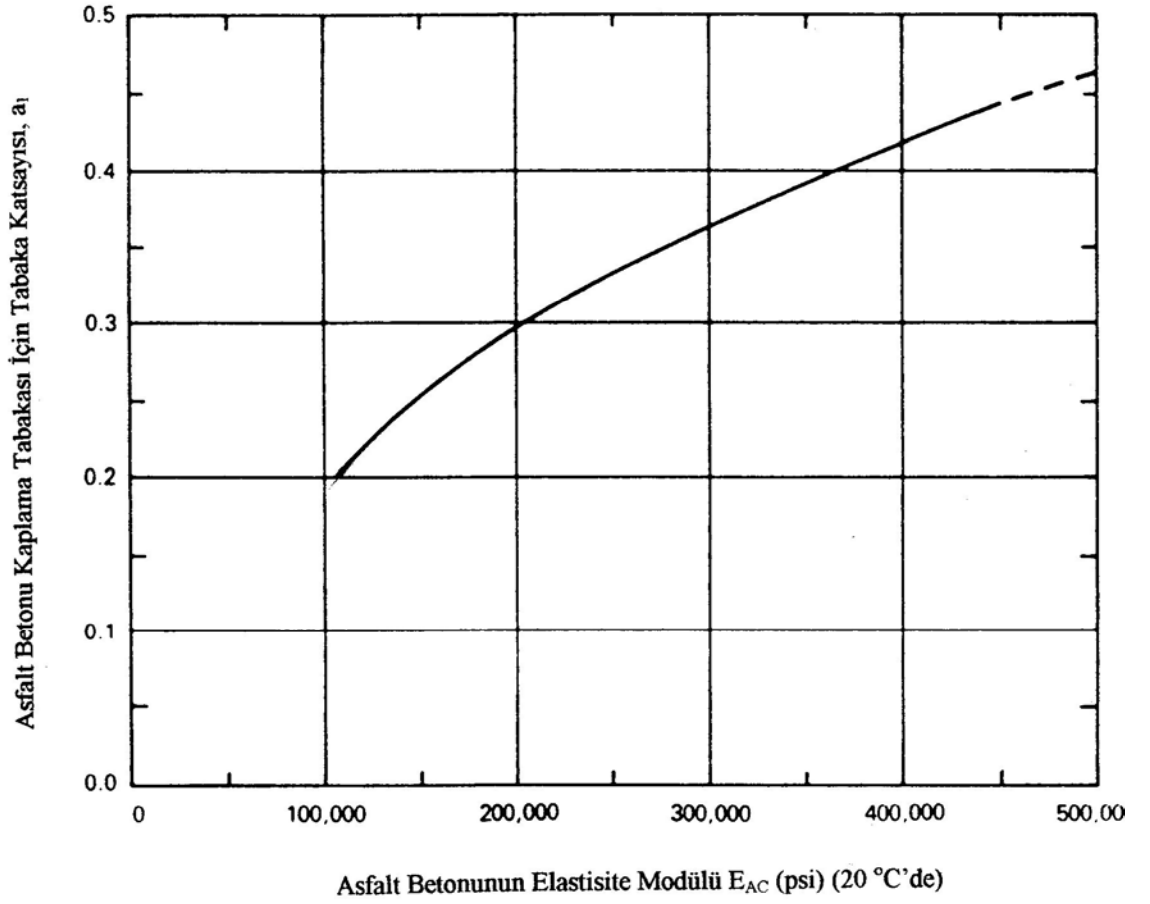
Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
6	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
8	0,008	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
10	0,018	0,015	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
12	0,036	0,030	0,027	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
14	0,066	0,056	0,050	0,048	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
16	0,111	0,095	0,087	0,083	0,081	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080
18	0,174	0,153	0,140	0,135	0,132	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
20	0,260	0,234	0,217	0,209	0,205	0,204	0,203	0,203	0,203	0,203
22	0,368	0,341	0,321	0,311	0,307	0,305	0,304	0,303	0,303	0,303
24	0,502	0,479	0,458	0,447	0,443	0,440	0,440	0,439	0,439	0,439
26	0,664	0,651	0,634	0,625	0,621	0,619	0,618	0,618	0,618	0,618
28	0,859	0,857	0,853	0,851	0,850	0,850	0,850	0,849	0,849	0,849
30	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
32	1,38	1,38	1,44	1,47	1,49	1,50	1,51	1,51	1,51	1,51
34	1,72	1,71	1,80	1,88	1,93	1,95	1,96	1,97	1,97	1,97
36	2,13	2,10	2,23	2,35	2,45	2,49	2,51	2,52	2,52	2,52
38	2,62	2,54	2,71	2,92	3,06	3,13	3,17	3,19	3,20	3,20
40	3,21	3,05	3,26	3,55	3,76	3,89	3,95	3,98	4,00	4,00
42	3,90	3,65	3,87	4,26	4,58	4,77	4,87	4,92	4,95	4,95
44	4,72	4,35	4,57	5,06	5,50	5,78	5,94	6,02	6,06	6,06
46	5,68	5,16	5,36	5,95	6,54	6,94	7,17	7,29	7,36	7,36
48	6,80	6,10	6,25	6,93	7,69	8,24	8,57	8,76	8,85	8,85
50	8,09	7,17	7,26	8,03	8,96	9,70	10,17	10,43	10,58	10,58
52	9,57	8,41	8,40	9,24	10,36	11,32	11,96	12,33	12,54	12,54
54	11,3	9,8	9,7	10,6	11,9	13,1	14,0	14,5	14,8	14,8
56	13,2	11,4	11,2	12,1	13,6	15,1	16,2	16,9	17,3	17,3
58	15,4	13,2	12,8	13,7	15,4	17,2	18,6	19,5	20,1	20,1
60	17,9	15,3	14,7	15,6	17,4	19,5	21,3	22,5	23,2	23,2
62	20,6	17,6	16,8	17,6	19,6	22,0	24,1	25,7	26,6	26,6
64	23,7	20,2	19,1	19,9	22,0	24,7	27,3	29,2	30,4	30,4
66	27,2	23,1	21,7	22,4	24,6	27,6	30,6	33,0	34,6	34,6
68	31,1	26,3	24,6	25,2	27,4	30,8	34,3	37,1	39,2	39,2
70	35,4	29,8	27,8	28,7	30,6	34,2	38,2	41,6	44,1	44,1
72	40,1	33,8	31,3	31,6	34,0	37,9	42,3	46,4	49,4	49,4
74	45,3	38,1	35,2	35,4	37,7	41,8	46,8	51,5	55,2	55,2
76	51,1	42,9	39,5	39,5	41,8	46,1	51,5	56,9	61,3	61,3
78	57,4	48,2	44,3	44,0	46,3	50,7	56,6	62,7	67,9	67,9
80	64,3	53,9	49,4	48,9	51,1	55,8	62,1	68,9	74,9	74,9
82	71,8	60,2	55,1	54,3	56,5	61,2	67,9	75,5	82,4	82,4
84	80,0	67,0	61,2	60,2	62,2	67,0	74,2	82,4	90,3	90,3
86	89,0	74,5	67,9	66,5	68,5	73,4	80,8	89,8	98,7	98,7
88	98,7	82,5	75,2	73,5	75,3	80,2	88,0	97,7	107,5	107,5
90	109,0	91,0	83,0	81,0	83,0	88,0	96,0	106,0	117,0	117,0

Tablo 1.18: Rijit Üstyapılarda Üçlü Dingil ve $P_t=3.0$ için Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörler

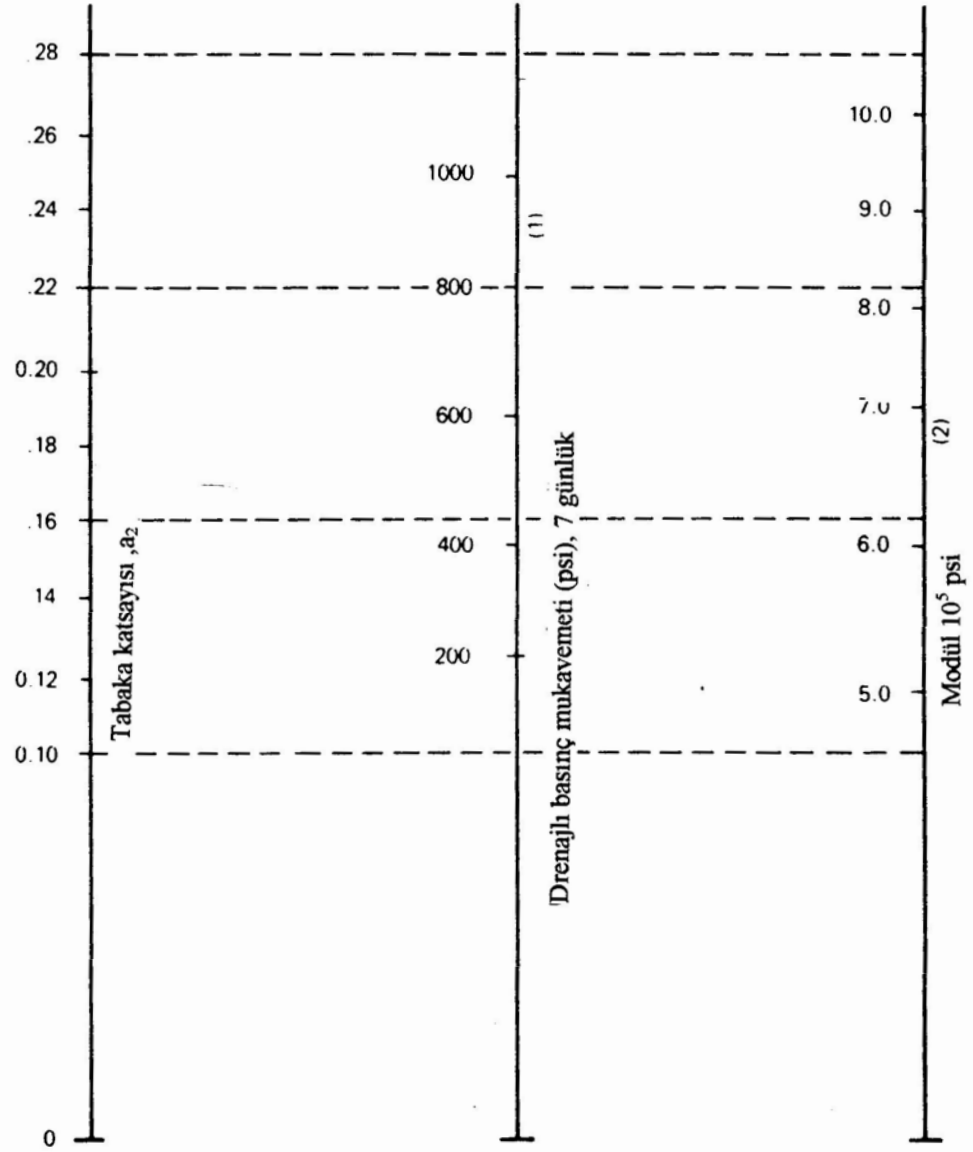
Dingil Yüğü (Kip)	Plak Kalınlığı d (inç)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
8	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,007	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
12	0,013	0,011	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
14	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016
16	0,039	0,033	0,030	0,028	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027
18	0,061	0,052	0,047	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043
20	0,091	0,078	0,071	0,068	0,067	0,066	0,066	0,066	0,066
22	0,132	0,114	0,104	0,100	0,098	0,097	0,097	0,097	0,097
24	0,183	0,161	0,148	0,143	0,140	0,139	0,139	0,138	0,138
26	0,246	0,221	0,205	0,198	0,195	0,193	0,193	0,192	0,192
28	0,322	0,296	0,277	0,268	0,265	0,263	0,262	0,262	0,262
30	0,411	0,387	0,367	0,357	0,353	0,351	0,350	0,349	0,349
32	0,515	0,495	0,476	0,466	0,462	0,460	0,459	0,458	0,458
34	0,634	0,622	0,607	0,599	0,595	0,594	0,593	0,592	0,592
36	0,772	0,768	0,762	0,758	0,756	0,756	0,755	0,755	0,755
38	0,930	0,934	0,942	0,947	0,949	0,950	0,951	0,951	0,951
40	1,11	1,12	1,15	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
42	1,32	1,33	1,38	1,42	1,44	1,45	1,46	1,46	1,46
44	1,56	1,56	1,64	1,71	1,75	1,77	1,78	1,78	1,78
46	1,84	1,83	1,94	2,04	2,10	2,14	2,15	2,16	2,16
48	2,16	2,12	2,26	2,41	2,51	2,56	2,58	2,59	2,60
50	2,53	2,45	2,61	2,82	2,96	3,03	3,07	3,09	3,10
52	2,95	2,82	3,01	3,27	3,47	3,58	3,63	3,66	3,68
54	3,43	3,23	3,43	3,77	4,03	4,18	4,27	4,31	4,33
56	3,98	3,70	3,90	4,31	4,65	4,86	4,98	5,04	5,07
58	4,59	4,22	4,42	4,90	5,34	5,62	5,78	5,86	5,90
60	5,28	4,80	4,99	5,54	6,08	6,45	6,66	6,78	6,84
62	6,06	5,45	5,61	6,23	6,89	7,36	7,64	7,80	7,88
64	6,92	6,18	6,29	6,98	7,76	8,36	8,72	8,93	9,04
66	7,89	6,98	7,05	7,78	8,70	9,44	9,91	10,18	10,33
68	8,96	7,88	7,87	8,66	9,71	10,61	11,2	11,55	11,75
70	10,2	8,90	8,80	9,60	10,8	11,9	12,6	13,1	13,3
72	11,5	10,0	9,80	10,6	12,0	13,2	14,2	14,7	15,0
74	12,9	11,2	10,9	11,7	13,2	14,7	15,8	16,5	16,9
76	14,5	12,5	12,1	12,9	14,5	16,2	17,5	18,4	18,9
78	16,2	13,9	13,4	14,2	15,9	17,8	19,4	20,5	21,1
80	18,2	15,5	14,8	15,6	17,4	19,6	21,4	22,7	23,5
82	20,2	17,2	16,4	17,2	19,1	21,4	23,5	25,1	26,1
84	22,5	19,1	18,1	18,8	20,8	23,4	25,8	27,6	28,8
86	25,0	21,2	19,9	20,6	22,6	25,5	28,2	30,4	31,8
88	27,6	23,4	21,9	22,5	24,6	27,7	30,7	33,2	35,0
90	30,5	25,8	24,1	24,6	26,8	30,0	33,4	36,3	38,3

E K-2

Tablo 2.1: Asfalt Betonunun Tabaka Katsayısının (a_1) Esneklik Modülüne Bağlı Olarak Bulunması

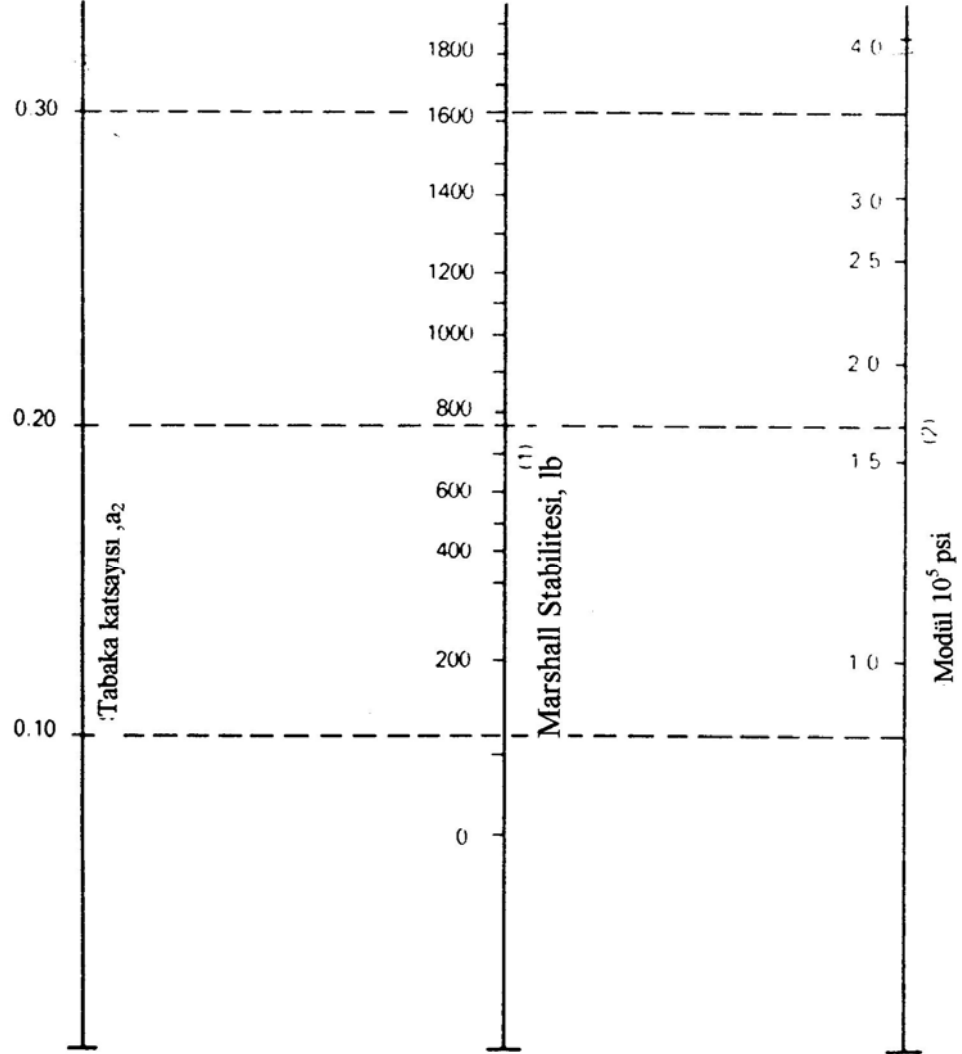


Tablo 2.2: Çimentolu Temel Tabakasının Tabaka Katsayısının (a_2) Bulunması



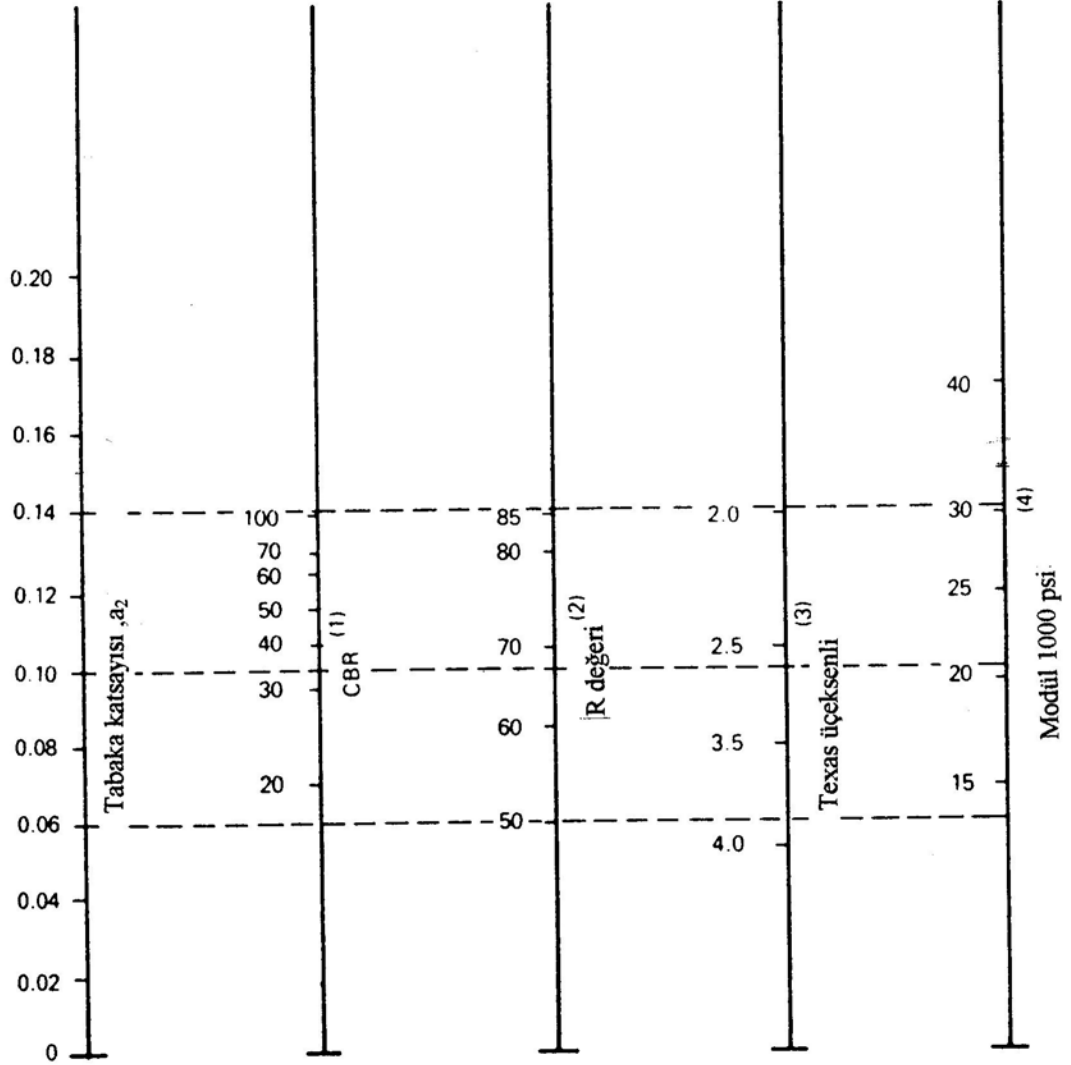
1. Ölçek İllinois, Louisiana ve Texas'da elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

Tablo 2.3: Bitümlü Temel Tabakasının Tabaka Katsayısının (a_2) Bulunması



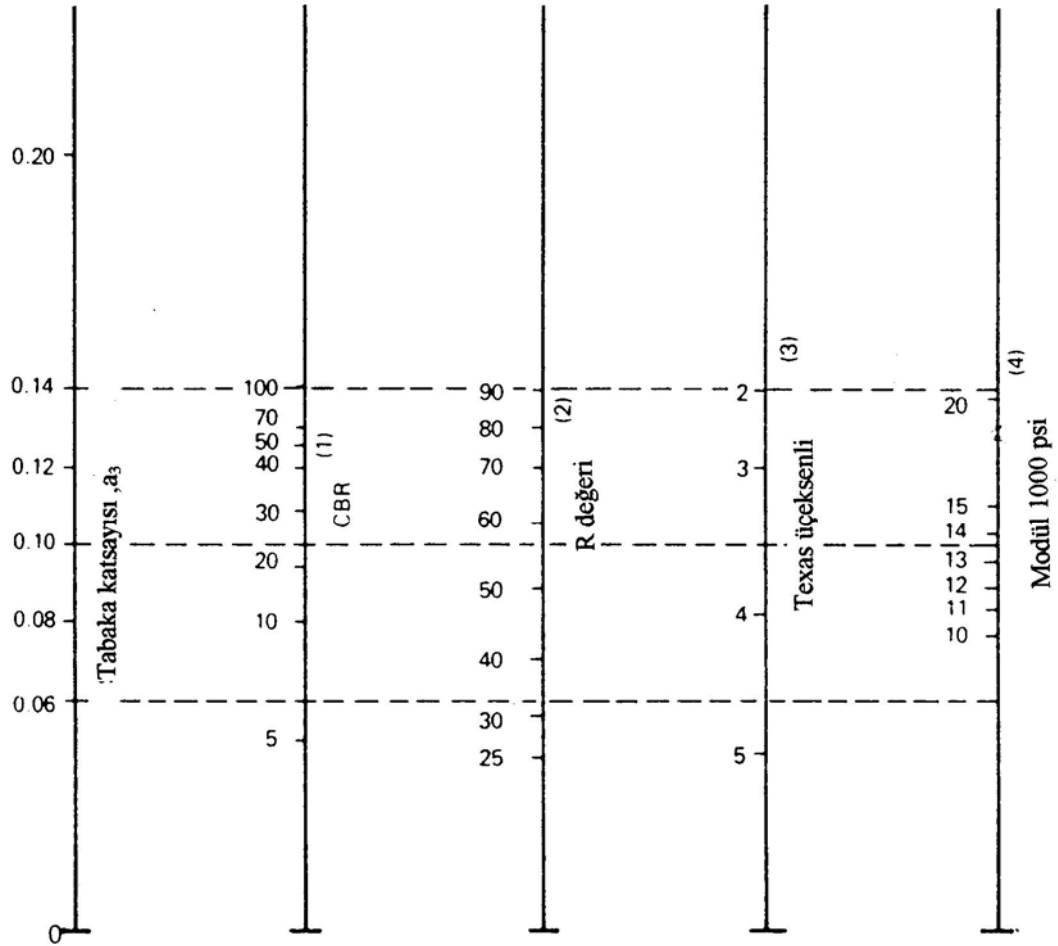
1. Ölçek Illinois'de elde edilen korelasyonların ortalamaları alınarak türetilmiştir
2. Ölçek NCHRP projesinden türetilmiştir

Tablo 2.4: Granüler Temel Tabakasının Tabaka Katsayısının (a_2) Farklı Gerilme Değerlerine Bağlı Olarak Bulunması



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

Tablo 2.5: Granüler Alt temel Tabakasının Tabaka Katsayısının (a_3) Farklı Gerilme Değerlerine Bağlı Olarak Bulunması



1. Ölçek İllinoiste 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

E K-3

Tablo 3.1: Donatılı Derz ve Beton Banketsiz Plaklar için Erozyon Faktörü (PCA)

Plak kalınlığı inç	k, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için

Tablo 3.2: Donatısız Derz ve Beton Banketsiz Plaklar için Erozyon Faktörü (PCA)

Plak kalınlığı inç	k, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.78/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için

Tablo 3.3: Donatılı Derzli ve Beton Banketli Plaklar için Erozyon Faktörü (PCA)

Plak kalınlığı inç	k, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.13	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/2.31	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için

Tablo 3.4: Donatısız Derzli ve Beton Banketli Plaklar için Erozyon Faktörü (PCA)

Plak kalınlığı inç	k, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.29	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.76/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.48	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.02/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.12	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

Not: Soldaki rakam tek dingil, sağdaki rakam tandem dingil için

Tablo 4.1: f_{jx} Faktörü(a) Summary of f_{jx} Values (Asphalt Concrete Tensile Strain)

Aircraft	Interval from Taxiway Centerline						
	0-1 ft	4-5 ft	8-9 ft	12-13 ft	16-17 ft	20-21 ft	24-25 ft
B-747	.45	.68	.62	.45	.68	.59	.18
B-747F	.45	.68	.62	.45	.68	.59	.18
B-707-320C	—	.15	.52	.60	.23	.02	—
B-707-120B	—	.15	.52	.60	.23	.02	—
B-720	—	.11	.44	.51	.18	.01	—
B-727-200	.05	.28	.62	.47	.12	—	—
B-737-200C	.05	.30	.56	.30	.04	—	—
CV-990	—	.14	.42	.36	.09	—	—
CV-880M	.01	.17	.44	.32	.06	—	—
L-500	.01	.22	1.00	1.66	1.24	.36	.02
L-1011-8	—	—	.06	.38	.71	.49	.11
L-1011-1	—	—	.06	.38	.79	.72	.27
DC-10-30CF	—	—	.09	.44	.81	.67	.23
DC-10-10	—	—	.09	.44	.81	.67	.23
DC-8-63F	—	.15	.48	.48	.15	—	—
DC-8-61	—	.15	.48	.48	.15	—	—
DC-9-41	.07	.29	.46	.21	.02	—	—
DC-9-15	.07	.29	.46	.21	.02	—	—
Concorde	—	.03	.24	.46	.24	.03	—
BAC-1-11-500	.14	.36	.42	.14	—	—	—
VIS-810	—	.03	.21	.33	.15	.01	—
SE-210-6R	.03	.19	.36	.19	.02	—	—

Tablo 4.2: f_{jz} Faktörü

(b) Summary of f_{jz} Values (Subgrade Vertical Strain)							
Aircraft	Interval from Taxiway Centerline						
	0-1 ft	4-5 ft	8-9 ft	12-13 ft	16-17 ft	20-21 ft	24-25 ft
B-747	.58	1.02	.90	.58	1.02	.88	.22
B-747F	.58	1.02	.90	.58	1.02	.88	.22
B-707-320C	—	.17	.71	.83	.28	.01	—
B-707-120B	—	.17	.71	.83	.28	.01	—
B-720	—	.17	.71	.83	.28	.01	—
B-727-200	.03	.21	.45	.28	.05	—	—
B-737-200C	.03	.21	.45	.28	.05	—	—
CV-990	.01	.24	.73	.63	.15	—	—
CV-880M	.01	.20	.64	.54	.12	—	—
L-500	—	.18	1.28	2.44	1.68	.34	—
L-1011-8	—	—	.09	.78	1.59	1.05	.18
L-1011-1	—	—	.03	.41	1.10	.96	.25
DC-10-30CF	—	—	.04	.45	1.18	1.03	.29
DC-10-10	—	—	.04	.45	1.18	1.03	.29
DC-8-63F	.01	.28	.83	.71	.17	—	—
DC-8-61	.01	.28	.83	.71	.17	—	—
DC-9-41	.05	.25	.40	.18	.02	—	—
DC-9-15	.05	.25	.40	.18	.02	—	—
Concorde	—	.03	.36	.80	.49	.08	—
BAC-1-11-500	.09	.27	.32	.10	—	—	—
VIS-810	—	.03	.21	.33	.15	.01	—
SE-210-6R	.02	.25	.59	.35	.05	—	—

Tablo 4.3: F_{jh} Faktörü (yorulma)

Aircraft	$h_1 = 10$ in.	$h_1 = 20$ in.	$h_1 = 30$ in.	$h_1 = 40$ in.	$h_1 = 50$ in.
L-500	.368	.721	1.098	1.49	1.832
B-747-F	.594	1.383	2.197	3.045	3.742
B-747	.392	.876	1.970	2.158	2.393
L-1011-8	1.692	3.843	6.234	8.542	10.863
DC-10-30	.594	.843	1.000	1.096	1.229
DC-10-10	.700	.736	.824	.752	.796
L-1011-1	.619	.707	.938	.716	.698
Concorde	.820	1.432	1.665	2.335	2.652
DC-8-63F	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B-707-320C	.480	.639	.772	1.000	.994
DC-8-61	.635	.626	.652	.638	.602
B-707-120B	.158	.189	.233	.255	.270
CV-990	.277	.446	.547	.606	.698
B-720B	.113	.149	.180	.198	.211
CV-880M	.134	.166	.188	.195	.220
B-727-200	.645	.303	.172	.119	.088
DC-9-41	.264	.076	.037	.022	.015
B-737-200C	.126	.047	.024	.015	.013
SE-210-6R	.013	.012	.013	.011	.013
BAC-1-11-5	.291	.063	.026	.014	.009
DC-9-15	.084	.026	.011	.007	.005
VIS-810	.069	.015	.006	.003	.002

Tablo 4.4: F_{jh} Faktörü (kalıcı deformasyon)

Aircraft	$h_1 = 10$ inches		$h_1 = 20$ inches		$h_1 = 30$ inches		$h_1 = 40$ inches	
	c	A_1	c	A_1	c	A_1	c	A_1
L-500	-.260	.240	.320	-.191	.656	-.389	.927	-.519
B-747F	.142	-.071	.716	-.310	1.597	-.425	2.721	-.494
B-747	.606	-.335	.667	-.364	.716	-.404	.769	-.460
L-1011-8	.450	-.302	.255	-.008	-.017	.252	-.381	.515
DC-10-30CF	-.233	.174	.331	-.160	.639	-.344	.972	-.506
DC-10-10	-.315	.168	.209	-.172	.810	-.461	1.258	-.691
L-1011-1	-.529	.297	.677	-.338	1.345	-.434	2.000	-.415
Concorde	-.673	.349	-.700	.388	-.749	.387	-.869	.369
DC-8-63F	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
B-707-320C	.195	-.210	.639	-.378	.895	-.482	1.012	-.541
DC-8-61	.395	-.241	.551	-.273	.755	-.364	1.070	-.518
B-707-120B	.821	-.622	.959	-.699	1.062	-.739	1.250	-.796
CV-990	.659	-.495	.800	-.518	.906	-.581	1.142	-.730
B-720B	.985	-.753	.995	-.755	.997	-.755	1.001	-.755
CV-880M	.836	-.706	.876	-.731	.873	-.766	.839	-.817
B-727-200	.446	-.243	.456	-.426	.153	-.646	.000	-1.000
DC-9-41	.894	-.626	.899	-.736	.583	-.844	.041	-.992
B-737-200	.789	-.680	.876	-.811	.860	-.879	.884	-.931
SE-210-6R	.801	-.819	.595	-.840	.309	-.866	.139	-.930
BAC-1-11-500	.663	-.582	.651	-.687	.484	-.845	.000	-1.000
DC-9-15	.893	-.786	.976	-.852	1.015	-.925	1.041	-1.000
VIS-810	.766	-.775	.923	-.869	1.135	-1.005	1.412	-1.199

ÖZGEÇMİŞ

Eda KÖK 1980 yılında İskenderun'da doğdu. İskenderun Barbaros Lisesini bitirdikten sonra, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nü tamamladı. Aynı Fakültenin, Ulaştırma Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini sürdürdü. Halen, Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti.' nde Yol ve Kavşak Grubu Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.