

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

79169

ASFALT BETONU ÜSTYAPILARDA YORULMA
DİRENİMİ

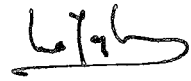
İnşaat Mühendisi Oğuzhan İMAMOĞLU

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan


YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa İLİCALI


Prof. Dr. Nurdur YATLA

 22.12.1998

Prof. Dr. Sennin BAYRAKDAR

 22/12/1998

Doç. Dr. Mustafa İLİCALI

 22.12.1998

İSTANBUL, 1998

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	i
TABLO LİSTESİ.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. YORULMA KAVRAMININ ARKA PLANI ve YORULMA LİTERATÜRÜNE GENEL BİR BAKIŞ.....	4
2.1 Yorulmanın Genel Tanımı.....	4
2.1.1 Yorulma olayı.....	4
2.2 Asfalt Betonlu Kaplamalarında Yorulma Direnimi ve Etkileyen Faktörler.....	7
2.2.1 Asfalt betonu kaplamalarında yorulma kavramı.....	7
2.2.2 Asfalt betonu kaplamalarında yorulma direnimini etkileyen faktörler.....	7
2.2.2.1 Numune üretim yöntemi.....	8
2.2.2.2 Yükleme modu.....	14
2.2.2.3 Karışım değişkenleri.....	15
2.2.2.4 Yük ve çevre değişkenleri.....	18
2.3 Değerlendirilen Bilgilerdeki Sınırlamalar.....	21
2.4 Deney Metodları ve Gelişimleri.....	21
2.5 Üstyapı Dizayn Sistemi ve Yorulma Alt Sistemi.....	22
2.5.1 Asfalt betonu kirişlerinin tekrarlı eğilme altındaki davranışları.....	25
2.5.2 Asfalt betonu tabakasının tekrarlı yükler altındaki davranışı.....	39
3. YORULMA DENEYİ METODLARI.....	51
3.1 Basit Eğilme.....	52

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
3.1.1	Orta nokta ve üç nokta yüklemesi..... 52
3.1.2	Konsol yüklemesi..... 53
3.1.3	Değerlendirme..... 58
3.2	Mesnetli Eğilme..... 59
3.3	Eksenel..... 61
3.3.1	Çekme..... 61
3.3.2	Çekme/Basınç..... 62
3.4	Dairesel Deney..... 65
3.5	Üç Eksenli..... 69
3.6	Bozulma Mekanizması..... 72
3.7	Trafik altında sıkıştırma Deneyi 76
3.7.1	Laboratuvar deneyleri..... 76
3.7.2	Gerçek boyutlu deneyler 78
3.8	Deney Metodlarının Değerlendirilmesi 80
4.	BOZULMA KAVRAMI..... 84
4.1	Deformasyon..... 85
4.2	Deviatör Gerilme..... 87
4.3	Deformasyon İşİ..... 88
4.4	Harcanan Enerjinin Sabitliği..... 89
4.5	Deformasyon İşİ ve Harcanan Enerji..... 94
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA İLE ARAZİ PERFORMANSI İLŞKİSİ..... 97
5.1	Dönüştürme Faktörü..... 97
5.2	Üstyapı Analizinde Temel Karışım Özellikleri..... 98

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
6. İSTANBUL'DA ÜRETİLEN ASFALT BETONUNUN YORULMA ÖMRÜ.....	..100
6.1 Korelasyonlar ve Basitleştirmeler.....	..100
6.1.1 Doğrudan Gerilme Testi.....	..100
6.1.2 Bozulma Zarfı.....	..105
6.1.3 Diğer sadeleştirmeler.....	..107
6.2 İstanbul da Üretilen Asfaltın Yorulma Ömrü Tayini.....	..109
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	..117
7.1 Numune İmalatı.....	..117
7.2 Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler.....	..117
7.3 Deney Metodları.....	..118
KAYNAKLAR.....	..119
ÖZGEÇMİŞ.....	..122

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Muhtelif durumlardaki gerilme hali..... 5
Şekil 2.2	Sıkıştırma metodunun izafi karışım stabilitesine etkisi.... 11
Şekil 2.3	Dönen sıkıştırma metodunun çalışma prensibi..... 11
Şekil 2.4	Değişik tipteki karışımlar için taşınabilir çelik tekerlek simülatörü ile hazırlanmış sıkıştırma gücü eğrileri..... 13
Şekil 2.5	Yükleme tipleri..... 19
Şekil 2.6	Yatay gerilme ile yüklenme derinliği arasındaki ilişki..... 20
Şekil 2.7	Üstyapı sisteminin blok diyagramı..... 30
Şekil 2.8	Yorulma alt sisteminin blok diyagramı..... 31
Şekil 2.9	Çatlak şekilleri..... 41
Şekil 2.10	Muhtemel çatlak yayılma tipi (Majidzadeh ve Ramsamooj)..... 48
Şekil 2.11	Normal gerilme altında eliptik çatlak..... 49
Şekil 2.12	Çatlak yayılma tipi..... 50
Şekil 3.1	Üç noktalı eğilme aparatı..... 54
Şekil 3.2	Orta nokta eğilme aparatı..... 55
Şekil 3.3	Pell'in kullandığı eğilme aparatı..... 56
Şekil 3.4	Deformasyon bükülme yorulma makinesi..... 57
Şekil 3.5	Bükme yorulma deney makinesi..... 57
Şekil 3.6	Yorulma deney aparatı..... 60
Şekil 3.7	Doğrudan aksenal yorulma deneyinin şematik temsili..... 64
Şekil 3.8	Dairesel yüklemenin konfigrasyonu ve kırılması..... 67
Şekil 3.9	İzafi basınç dağılımı ve dairesel gerilme deneyi için iki aksenli gerilme durumu..... 67
Şekil 3.10	Üç aksenli yorulma yükleme aleti..... 70
Şekil 3.11	Üç aksenli, aksenal ve radyal yük kontrollü deney aleti... 71
Şekil 3.12	Bozulma özelliklerinden faydalanarak yorulma ömrü hesap diyagramları..... 74
Şekil 3.13	Tekerlek yolu makinesinin şematik temsili..... 77
Şekil 3.14	Lineer test yolu – Nottingham Üniversitesi..... 79
Şekil 4.1	Çeşitli hız ve sıcaklıklarda yorulma testi sonuçları..... 86
Şekil 4.2	Çeşitli karışımlar için deformasyon yorulma ömrü testleri..... 86
Şekil 4.3	Enerji oranı ve karışım rijitliğinin asfalt betonu ile olan ilişkisi..... 89
Şekil 4.4	Bükülme enerjisi..... 96
Şekil 6.1	Doğrudan gerilme test aparatı..... 102
Şekil 6.2	Doğrudan gerilme test aparatı..... 103
Şekil 6.3	Tip 2 karışımında kullanılan agrega gradasyonu grafiği..... 110

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 6.4	Tip 2 karışımında kullanılan agrega gradasyonu grafiği.....	..111
Şekil 6.5	Tip 2 karışımı Marshall stabilite deney sonuçları grafiği.....	..114
Şekil 6.6	Tip 4 karışımı Marshall stabilite deney sonuçları grafiği.....	..115



TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü yüklemenin kıyaslanması..... 16
Tablo 2.2	Asfalt kaplaması karışımının ve yorulma davranışına etki eden faktörler..... 17
Tablo 2.3	Dalga şeklinin yorulma ömrü üzerine etkisi..... 20
Tablo 2.4	Yorulma testi karakteristikleri özeti..... 23
Tablo 2.5	Yorulma testi ve değerlendirmelerinin kronolojisi..... 26
Tablo 2.6	Yorulma özelliğine etki eden laboratuvar test değişkenleri. ... 38
Tablo 3.1	Test metodlarının kıyaslanması..... 82
Tablo 6.1	Seçilen kesitlerdeki trafik sayım ve TEF değerleri 109
Tablo 6.2	Tip 2 karışımı Marshall stabilite deney sonuçları..... 112
Tablo 6.3	Tip 4 karışımı Marshall stabilite deney sonuçları..... 113
Tablo 6.4	Seçilen trafik kesitlerinde elde edilen asfalt betonu üstyapısı yorulma ömrü..... 116

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince, değerli katkı ve değerlendirmeleriyle çalışmalarına yön veren, yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa ILICALI'ya, araştırmalarım boyunca bilgi ve kaynak olarak en büyük desteği sağlayan Araş. Gör. Halit ÖZEN'e, şekil ve tabloları hazırlamamda yardımcı olan İnş. Teknik. Hamdi GÜLAÇTI'ya, Ulaşım Uzmanı Şeh. Plan. Vedat USLU'ya, Yük. Şeh. Plan. İhsan İLZE'ye ve sabırla bana maddi ve manevi destek olan **anneme, babama** Şehir Planlama Müdürlüğündeki mesai arkadaşlarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzhan İMAMOĞLU

Eylül, 1998

ÖZET

Asfalt betonu karışımlarının yorulma direnimlerinin ölçülmesinde kullanılan deneyleri değerlendirmek ve yorulma direnimi hakkında bilinenleri özetlemek ve amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Yapılan çalışmaların ışığında İstanbul kent içinde uygulanmakta olan asfalt betonu kaplamaların yorulma ömürlerinin tahminine yönelik bir değerlendirme yapılmıştır.

Yorulma deneyleri hakkında bilgi verilmiş ve deneyler aşağıda sıralanan kategorilere ayrılmıştır. Bunlar; basit eğilme, mesnetli eğilme, doğrudan eksenel, dairesel, üç eksenli, bozulma mekanizması ve trafik altında sıkıştırma deneyidir.

Herbir deney metodunun değerlendirilmesinde kriterler olarak;

- a) Arazi şartlarını temsil etme,
- b) Basitlik ve
- c) Servis şartlarındaki performansı ile arasındaki korelasyon göz önüne alınmıştır.

Bu şartları sağlamak yönünde gelecek vaat eden üç deney metodu; basit eğilme, dairesel yorulma ve bozulma mekanizmasını esas alan deneyler görülmektedir. Bunların dışında bir yorulma deneyi olmamasına rağmen doğrudan çekme deneyi de basit yorulma deneyi olarak söylenebilir. Fransız araştırmacılar yorulma deney sonuçları ile doğrudan çekme deneyi arasında iyi bir korelasyon bulmuşlardır.

Yorulma direnimini etkileyen faktörler olarak; numunelerin üretimi, yükleme modu, karışım değişkenleri ile yük ve çevre değişkenleri sıralanabilir. Bir çok numune üretim veya sıkıştırma metodlarının arazi şartlarını iyi derecede temsil ettikleri gözlenmektedir (teker altında, yoğunmalı ve dönen metodlar). Hatta bu üç metolla sıkıştırılan numunelerin arasında yorulma direnimi açısından bir farklılık olacağı tahmin edilmemektedir.

Laboratuvar deneyleri için tipik yükleme modları olan kontrollü-gerilme veya kontrollü-deformasyon yorulma direnimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir faktördür. Kontrollü-gerilme deneylerinde esas olarak çatlak başlangıcı için gerekli yük hesaplanır: Kontrollü-deformasyon deneylerinde çatlak başlangıcı kadar çatlağın ilerlemesinin de dahil edilmesi nedeniyle daha uzun yorulma ömürleri elde edilmektedir.

Karışımın rijitliğini etkileyen iki değişken olan hava boşluğu ve sıcaklık yorulma direnimi üzerinde diğer değişkenlere nazaran daha büyük bir etkiye sahiptir. Ancak çoğu karışımda, yük ve çevre faktörleri de yorulma direnimi üzerinde etkiye sahiptirler ve deneysel çalışmalarda her ikisi de göz önüne alınmalı ve üstyapıların yorulma direnci için asfalt ve karışım özelliklerinin belirlenmesi şarttır.

Sonuç olarak, önceden yapılmış olan çalışmaların çoğunda maksimum asal çekme deformasyonu yorulma hasarının belirlenmesi veya sebebi olarak kullanılmıştır ve karışık trafik yükü altındaki bu bozulmanın kümülatif toplamı kullanılmıştır. Diğer bozulma tespit yöntemleri olarak kümülatif bozulma yöntemi kadar deformasyon işi ve harcanan enerjinin sabitliği de alternatifler olarak bahsedilebilir.

Anahtar kelime :Yorulma – Yorulma deneyleri

ABSTRACT

To evaluate test procedures for measuring the fatigue response of asphalt paving mixtures and to put forward what is known about the factors that influence fatigue response is an important problem for design engineers.

Available test methods are conveniently classified into the following categories: simple flexure, supported flexure, direct axial, diametral, triaxial, fracture mechanics, and wheel-track testing. Criteria used to each method for its potential use as a laboratory standard included: (1) ability to simulate field conditions, (2) applicability of test results for use in modelling pavement performance, (3) simplicity, and (4) correlation of results with performance of in- service pavements. The three most promising methods are considered to be simple flexure, diametral fatigue, and test based on fracture mechanics principles. Although not a fatigue test in itself, direct tension testing offers considerable potential as a simple surrogate for more complex fatigue tests: French researchers have achieved quite good correlations between direct tension and fatigue test results.

Factors affecting fatigue response include specimen fabrication, mode of loading, mixture variables, loading, and environmental variables. Among the various fabrication or compaction methods, rolling-wheel, kneading, and gyratory methods seem to best duplicate field compaction. Although fatigue response is not expected to differ among specimens compacted by these three methods, an evaluation of the possible effects of compaction method on fatigue response is in order since prior compaction research has focused on other engineering properties.

Mode of loading, typically either controlled-stress or controlled strain for laboratory testing is one of the primary factors affecting fatigue response. Controlled-stress tests essentially measure the loading necessary for crack initiation: longer fatigue lives are recorded in controlled-strain tests because crack propagation is included as well.

Air void content and temperature both affecting mixture stiffness may have more significant influence on fatigue response than any other variables. However, many mixture, load, and environmental factors also influence fatigue response and must be considered both in the development of test protocols and in the determination of asphalt and mixture properties that are essential for fatigue-resistant pavements.

Finally, in most prior work, the maximum principal tensile strain has been used as the cause or determinant of fatigue damage, and the linear summation of cycle ratios hypothesis has been used to accumulate this damage under mixed traffic loading. Other damage determinants, such as work strain as well as cumulative failure laws, such as constancy of dissipated energy, offer possible alternatives.

Keyword: Fatigue-Fatigue tests

1. GİRİŞ

Karayolu üstyapısında, asfalt betonu kaplamalarda tekrarlı yükler sebebiyle oluşan bozukluklar 1948'den beri araştırmacılar tarafından dikkatle incelenmektedir. "Yorulma Bozulması" terimi; taşıt yüklerinin tekrarı sebebiyle asfalt betonunda oluşan bozulmalar için kullanılır. Asfalt betonu karışımının eğilme mukavemetinden daha büyük gerilme uygulandığı zaman, genellikle asfalt betonu içinde **yorulma çatlakları** başlar. Bu olay dingil yüklerinin tekrar sayısının artmasından dolayı zamanla ortaya çıkar ve gelişir, mukavemet ve rijitlik gibi malzeme özelliklerinin değişmesine neden olur. Dingil yükü sayısının artmasından dolayı, malzeme özelliğinin değişmesinde etkin faktör olan eğilme gerilmelerindeki (defleksiyon) artışı sürerek, asfalt betonu karışımının mukavemeti ve rijitliğinde sürekli bir düşmeye sebep olur. Arazide, yorulma etkisi ile üstyapı bozulmalarının ilerlemiş aşaması olarak, timsah sırtı (alligator) veya harita (map) tipi çatlakların kaplama tabakası yüzeyinde görülmektedir.

Asfalt betonunu kaplamalı üstyapılarının yorulması veya tekrarlı eğilmeden oluşan üstyapı bozulmaları 1948 den beri Amerika Birleşik Devletlerinde (Hveem and Carmany, 1948) de iyi tanınan bir problemdir. Karışım ve üstyapı dizaynında yorulma bozulmalarını bilmek için arazide ortaya çıkan tipteki tekrarlı gerilmeler altında asfalt betonu karışımların davranışını tanımlamak gereklidir. Buradan hareketle , arazi şartlarını en iyi tanımlayacak olan nispeten basit deneyi (deneyleri) önerebilmek için çeşitli yorulma deneylerinin değerlendirmesinin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, farklı yorulma deneylerine kısaca incelemek, asfalt-agrega karışım analiz sistemini en uygun şekilde biraraya getirmek ve asfalt betonu karışımların yorulma direnimini tanımlamak için en uygun metodu önermektir.

Yoğun derecelenmiş asfalt betonunun yorulma karakteristiklerinin bir değerlendirmesi ile birlikte bunların ölçülmesinde kullanılan deney metodolojileri bu çalışmada araştırılmaktadır.

Ayrıca yorulma tekrarlı gerilmelerden dolayı oluşan çatlama olarak ele alınmaktadır. Bu yapılan çalışmalardan arazi ve laboratuvar çalışmaları olarak bir çok prosedür bulunduğu görülmüştür. Bu prosedürler farklı deney teknikleri, ekipman tipleri, numune konfigürasyonu, yükleme modu ve tipi gibi deney şartlarına (örneğin yük frekansı, sıcaklık gibi,) ve analiz işlemlerine sahiptirler.

Buradan hareketle bu çalışmada hedefler;

1. Yoğun derecelenmiş asfalt betonu karışımların yorulma performansını etkileyen faktörleri incelemek.
2. Asfalt betonu kaplamaların dizayn ve analizi için gerekli olan yorulma ömrü ve ilgili parametrelerin ölçülmesi için gerekli adımları özetlemek,
3. Herbir deney metodunun yararlarını ve sakıncalarını ortaya koymak ve
4. Karışımların değerlendirilmesi ve dizaynı kadar üstyapının arazideki ömrünü tahmin etme ve yorulma direniminin ölçülmesinde kullanılan metodları tercihlere göre değerlendirmek ve listelemektir

Bu çalışmada aşağıda sıralanan metodlar analiz edilmiştir:

1. Basit eğilme deneyi,
2. Mesnetli eğilme deneyi,
3. Doğrudan aksenal deney,
4. Dairesel deney,
5. Üç eksenli deney,
6. Bozulma mekanizması deneyi ve
7. Trafik altında sıkıştırma deneyleridir.

Yorulmaya ilişkin olarak iki ilave hususa dikkat edilir. Biri kalıcı deformasyon ve ısısızal çatlaklar için tanımlanan bozulma zarfını esas alan uygun bir asfalt muhtevasının belirlenmesi ile dolaylı ilişkilidir. Diğer de, asfalt betonu kaplamaların yüzeye yakın veya orjinindeki çatlamayla birleşmiş olan yüklemeye olayı ile ilgilidir.

Monismith, kalın tabakalar için ($>4''$) gerilme-kontrollü, ince tabakalar için ($<2''$) deformasyon-kontrollü ve ikisi arası için gerilme-kontrollü ve deformasyon-kontrollü deneyler arasından herhangi birini önermiştir. Gerilme-kontrollü deneylerde başlangıç rijitliği en büyük olan numunelerin performansı en yüksek değerlere çıkmaktadır, bununla birlikte deformasyon- kontrollü deneylerde bunun tam tersi sözkonusudur.

Çatlağın yayılma tipi, yüklemeye karşısında üstyapının davranışını ve yüklemeye tarihini açıklamada ayrıca yolun servis kabiliyeti indeksi için çok önemli bir parametre olmaktadır. Servis kabiliyeti, sürüş konforu, emniyet ve hatta ekonomik kaygılar gibi yol yüzeyi özellikleri , çatlak tipi ve yayılmasıyla çok ilişkilidir. Çağımızda üstyapı biçimi, özellikle bitümlü yüzeyler, bakım mühendisleri, dizayn mühendisleri ve hatta halk tarafından, servis kabiliyeti açısından sistemli ve periyodik olarak incelenmiştir. Çatlak tipi ve yayılması, servis kabiliyeti indeksinin bağımlı değişkenlerinden birisi olması sebebiyle bu konuda araştırma yapanlar açısından iyice değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada yorulma ömrü deneyleri incelenmiş, yararları ve sakıncaları ortaya konulmuş, karşılaştırmalar yapılarak ülkemiz şartlarına en uygun deney ve basitleştirmelerin araştırmaları yapılmıştır.

2. YORULMA KAVRAMININ ARKA PLANI VE YORULMA LİTARATÜRÜNE GENEL BİR BAKIŞ

2.1 Yorulmanın Genel Tanımı

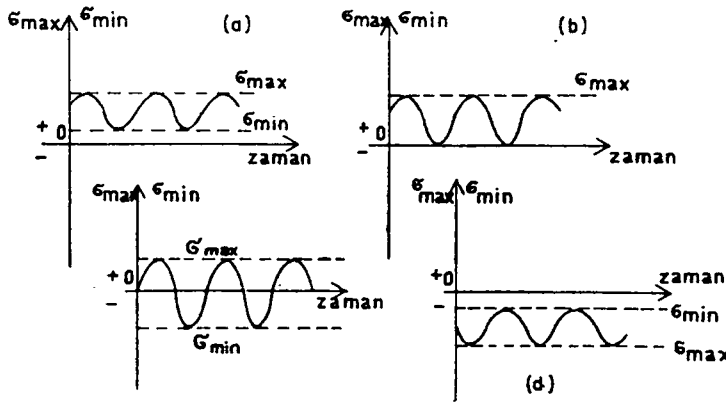
Yapıların sabit yüklerden başka, hareketli yüklerin tesirine maruz kaldığı bilinmektedir. Hareketli yüklerin önemli bir nispette bulunması halinde yapılar değişken kuvvetlerin ve dolayısıyla değişken gerilmelerin tesiri altında bulunur. Bu durumun doğal bir neticesi olarak bir yapı elemanının herhangi bir kesitine ait bir noktanın σ_{\min} ile σ_{\max} gibi iki limit arasında değişken bir gerilmeye maruz kalmasına “yorulma” denir. σ_{\max} malzemenin mukavemetinden küçük dahi olsa, gerilmenin yukarıdaki limitler arasında pek çok defa değişmesi malzemenin yorulma tesiriyle mukavemetini kaybetmesine sebep olabilir. Bundan dolayı değişken kuvvetlerin bulunduğu hallerde cismin maruz kaldığı maksimum gerilme yorulma limiti denilen bir karakteristikten küçük olmalıdır. Diğer bir deyişle bu gibi hallerde emniyet gerilmeleri deneylerde bulunan karakteristiklere (basınç mukavemeti, elastik limit gibi) bağlı olarak değil de yorulma limiti cinsinden tayin edilmelidir. Yorulma pratikte sık rastlanan bir olaydır. Köprülerin bilhassa çelik köprülerin elemanları bu çeşit zorlamaların tesiri altında bulunur. Raylar, her türlü motorlu taşıt dingilleri, uçak kanatları yorulmaya maruz kalmaktadır. Bu gibi hallerde malzemenin yorulma ile ilgili özellikleri göz önünde bulundurularak kesit hesapları yapılmalıdır.

2.1.1 Yorulma olayı

Bir çelik numunesini değişken gerilmelerin tesirine maruz bırakabilmek için özel yorulma aletleri denilen deney cihazları kullanılmaktadır. Bu aletlerde bulunan tertibat sayesinde gerilmeler iki limit arasında zamanın sinüzoidal bir fonksiyonu olarak değişmektedir. (Şekil 2.1) de (σ_{\min}) ve (σ_{\max}) nın muhtelif durumlarına göre gerilme-zaman eğrisinin şekilleri gösterilmektedir. Çekme gerilmeleri (+) olarak alındığına göre (a) da malzeme yalnız değişken çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. (b) de

cisim yine çekme gerilmelerinin tesiri altında ise de burada σ_{\min} sifira eşittir. (c) halinde ise $-\sigma_{\max}=\sigma_{\min}$ dir,yani malzemeye aynı değerde maksimum çekme ve basınç gerilmesi arasında değişen gerilmeler tesir etmektedir. Yorulmada bu sonuncu durum özel bir hal olup buna alternatif gerilme hali denir. (d) de ise malzeme yalnız değişken basınç gerilmelerinin tesiri altındadır.

Gerilmenin $(\sigma_{\max}+\sigma_{\min}) / 2$ den itibaren artarak σ_{\max} 'a eşit olması ve bundan sonra azalarak σ_{\min} ' düşmesi ve sonra tekrar yükselerek baştaki değeri almasıyla malzeme üzerinde bir yükleme ameliyesi yapılmış olur. Bu ameliye deney aletlerindeki özel tertibat sayesinde belirli bir müddet içinde belirli defa tekrar edilir. Bu şekilde saniyede yapılan yükleme adedine yorulma deneyinin frekansı denir. Genel olarak frekans muayyen bir sınırı aşmamak şartıyla mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Zira bu takdirde yorulma deneyinin süresini önemli derecede azaltmak imkan dahiline girmektedir. Bu günkü yorulma deneyi aletlerinde saniyede frekans kolaylıkla 130-150 değerine ulaşabilmektedir.



Şekil 2.1 Muhtelif durumlardaki gerilme hali (Mustafa İnan)

Netice itibariyle yorulma deneylerinde (σ_{\min}) ve (σ_{\max}) seçildikten sonra bu limitler arasında muayyen bir frekansla yükleme yapılmaktadır. Alette mevcut bir sayaçtan yapılan toplam yükleme adedinin her an değerini bulmak mümkün olmamaktadır. (σ_{\max}) değeri kafi derecede büyük ise yükleme adedinin muayyen bir değere ulaşması halinde malzeme mukavemetini kaybederek kırılır. Yorulma tesiriyle kırılmaya sebep olacak (σ_{\max}) birçok hallerde malzemenin çekme mukavemetinden ve hatta elastik limitinden bir hayli küçük bulunmaktadır.

Yukarıda kısaca izah edildiği şekliyle yorulma deneylerinin yapılması için oldukça karışık tertipler ihtiva eden ve maliyeti bir hayli yüksek olan aletlere ihtiyaç vardır. Bu aletlerin dışında döner eğilme metodunu tatbik etmek suretiyle yorulma deneyini basit tip aletlerle de yapılması mümkündür. Burada dairesel kesitli bir çubuk şeklindeki malzeme alete tespit edilmekte, aletin motorunun dönmesiyle çubuk şeklindeki malzeme alete tespit edilmekte, aletin motorunun dönmesiyle çubuk kendi eksenini etrafında dönmektedir. Konsol kiriş olarak çalışan epruvetin ucuna bir ağırlık asmak suretiyle kuvvet tatbik edilir, ve böylelikle çubuğun herhangi bir noktası (σ_b) gibi bir basınç gerilmesine maruz iken bu nokta çubuğun eksenini etrafında 180^0 döndükten sonra yine (σ_b) ye eşit bir çekme gerilmesinin tesiri altında bulunur. Yani bu deney metodu ile yalnız alternatif gerilme hali elde edilmektedir. Çubuğun çapı (d), tatbik edilen ağırlık P ise kuvvetin tatbik noktasından (l) mesafesinde bulunan kesitin çevresindeki noktalarda gerilmeler şu değerler arasında değişmektedir:

$$\frac{-Pl}{d^3 / 32} \text{ ile } + \frac{Pl}{d^3 / 32} \quad 2.1$$

Bazı hallerde yorulma olayını tarif eden (σ_{\min}) ile (σ_{\max}) yerine ortalama gerilme ve ortalama gerilme genliği kullanılır. Bu değişkenler aşağıda ifade edilmiştir:

$$S = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad 2.2$$

2.2Asfalt Betonlu Kaplamalarında Yorulma Direnimi ve Etkileyen Faktörler

2.2.1 Asfalt betonu kaplamalarında yorulma kavramı

“Yorulma Bozulması” terimi; taşıt yüklerinin tekrarı sebebiyle asfalt betonunda oluşan bozulmalar için kullanılır. Heukelom ve Klomp yorulmayı; “çevresel etkiler sonucunda sürekli değişimlerin yığılımlı olarak toplanıp, uygulanan gerilmenin , gerilme dayanımına eşit olmasını sağlayan durum” olarak tanımlamışlardır. Deacon ise yorulmayı, “ Malzemede şartlara bağlı olarak gittikçe ilerleyen lokal ve sürekli olan değişikliklerdir ki, belirli nokta veya noktalarda değişken gerilmeler ve deformasyonlar oluşturur ve yeterli yüklemelerden sonra çatlak veya komple bir kırığa sebep olur. “ diye tanımlamıştır. Araştırmacılar yorgunluk olgusunu, asfaltlı sistemlerde çatlakların başlaması ve büyümesi olarak; yorgunluk ömrünü ise başlangıç sürecini kritik ölçülerdeki bir veya birkaç çatlığa çeviren tekrarlı yük devinimi olarak tarif etmişlerdir. Yorulma hasarının daha ilk yüklemeden itibaren başladığına inanıp çatlığın muhtemel yayılma tiplerini açıklamışlardır.

2.2.2 Asfalt betonu kaplamalarında yorulma direnimini etkileyen faktörler

Yorulma direnimini etkileyen faktörler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur

1. Numunenin üretim yöntemi,
2. Yükleme tipi (kontrollü-gerilme veya kontrollü-deformasyon),
3. Karışım değişkenleri,
4. Yük ve çevre şartları.

2.2.2.1 Numune üretim yöntemi

Numune üretim yöntemindeki birinci amaç, arazi şartlarında üretilen ve serilirken sıkıştırılan asfalt karışımlarını en iyi şekilde temsil edecek bir sıkıştırma yöntemi ile numuneleri hazırlamaktır. İzleyen bölümlerde bu konuyla ilgili olarak daha detaylı bilgi verilecektir.

Numunelerin üretiminde kullanılan sıkıştırma metodları;

1. Statik sıkıştırma,
2. Darbeli (Dinamik) sıkıştırma (impact),
3. Yoğurmalı sıkıştırma (kneading),
4. Dönerek sıkıştırma (gyratory) ve
5. Trafik altında sıkıştırma (wheel-tracking).

NCHRP/AAMAS (Asphalt Aggregate Mixture Analysis System/Asfalt Agregata Karışımı Analiz Sistemi) çalışmasında, seçilen sıkıştırma metodlarının değerlendirilmesi ile ilgili daha detaylı bilgi yer almaktadır.

Statik Sıkıştırma: Sıkışmamış asfalt karışımın, istenen boyut ve ebatta bir kalıp içerisine yerleştirilerek dereceli olarak artırılan bir statik yük altında sıkıştırılmasından ibarettir. Homojenliği sağlamak için karışım çubuklar vasıtasıyla şişlenmektedir ve kalıp içerisinde hareket edebilen iki adet silindir kullanıldığından kalıp serbest olarak hareket edebilmektedir. Bu metod ASTM D-1074'de de iki taraflı sıkıştırma işlemi olarak tanımlanmıştır. Bu metodun yoğurmalı, dönerek ve trafik altında sıkıştırma metodlarına göre üstünlüğü basitliğinden kaynaklanmaktadır. Ana sakıncası, agregata dağılımının araziye oranla farklı olması ve bu nedenle de arazi şartlarını tam olarak temsil etmemektedir.

Darbeli (Dinamik) Sıkıştırma: Bu metodolojide, karışımın üzerine sabit yükseklikten serbest olarak bırakılan belirli bir ağırlığın tekrarlı olarak düşürülmesiyle numune sıkıştırılmaktadır. Ağırlığın (tokmağın) düşme sayısı silindir ve trafik altında meydana gelecek olan sıkışmayı sağlayacak şekilde seçilir. Marshall (ASTM D-1559-82) Yönteminde bu metodoloji takip edilir.

Bu metodun yararı, oldukça basit, az maliyetli ve el ile çalıştırılması suretiyle yüksek enerji elde edilmesi ve pratik olmasıdır. Bu şekilde de arazi şartlarına benzer şekilde numune üretimi yapılabilmektedir.

İlk sakıncası sıkıştırma anında yüksek enerji transferi olması nedeniyle, asfalt filmlerinde kopma ve agrega parçacıkları birbiri üzerine binmektedir. Bundan dolayı da aşırı degradasyon ve bozulma ve/veya arazi şartlarından farklı şartlar oluşmaktadır.

Diğer bir sakıncası ise, tekrarlı etki ile sıkıştırmada hazırlanan numuneler belirli bir yıl sonunda lastik tekerin etkisi ile sıkışan asfalt kaplamalar gibi çift sıkıştırma etkisine maruz kalmaktadırlar. Bu şekilde bir sıkıştırma işlemi ise gereksizdir. Diğer bir sakıncası ise, homojen ve istenen boyutta numune hazırlama zorluğudur.

Yoğurmalı Sıkıştırma: Yoğurmalı sıkıştırma, Triaxial Institue nin himayesi altında University of California, Berkeley ve California Division of Highways'in bir araya gelmesi ile geliştirilmiştir.

Sıkıştırma işlemi sıkıştırılmış numune yüzeyinden daha küçük yüzeyli bir sıkıştırma yağı yardımıyla yapılmaktadır. Sıkıştırma yağı ile yapılan herbir yüklemekten sonra yük kademeli olarak arttırılıp, belirli bir süre sabit bırakıldıktan sonra yük kaldırılır. Her bir yüklemenin ardından numunenin yüzeyinde bir patlama oluşmaktadır. Bu metod da yükün sebep olduğu deformasyon ve agregaların karışım içindeki yönelimi araziden alınan numunelere benzerdir.

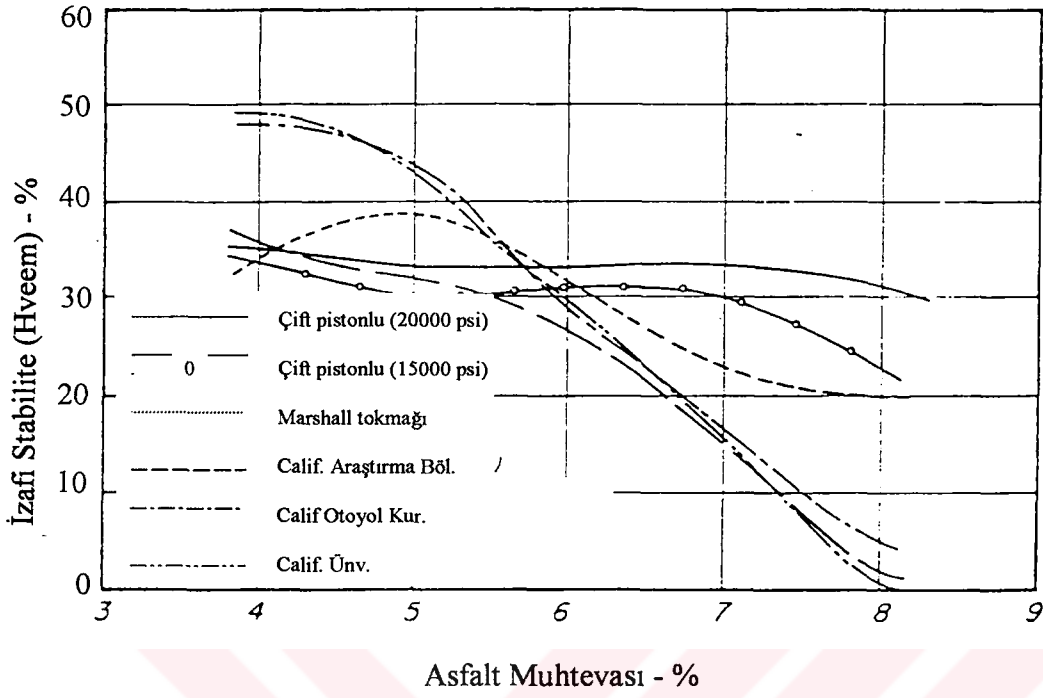
Bu alet ile 30 in uzunlukta kiriş numuneler ve 12 in yükseklikte ve 6 in yarıçapında silindirik numuneler üretmek mümkündür. Yapılan çalışmalar neticesinde araziden alınan karot numuneler ile laboratuarda hazırlanan numuneler arasında fiziksel ve mekanik özellikler bakımından iyi bir ilişki olduğu görülmüştür.

Şekil 2.2’de darbeli, statik ve yoğurmalı sıkıştırma yöntemleri ile hazırlanan numuneler üzerine yapılan Hveem Stabilometre deney sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi yoğurmalı sıkıştırma ile hazırlanan numunelerin asfalt muhtevası ile stabilitenin değişiminin hassasiyetinde mantıklı sonuçlar veren karışımların üretildiği görülmektedir.

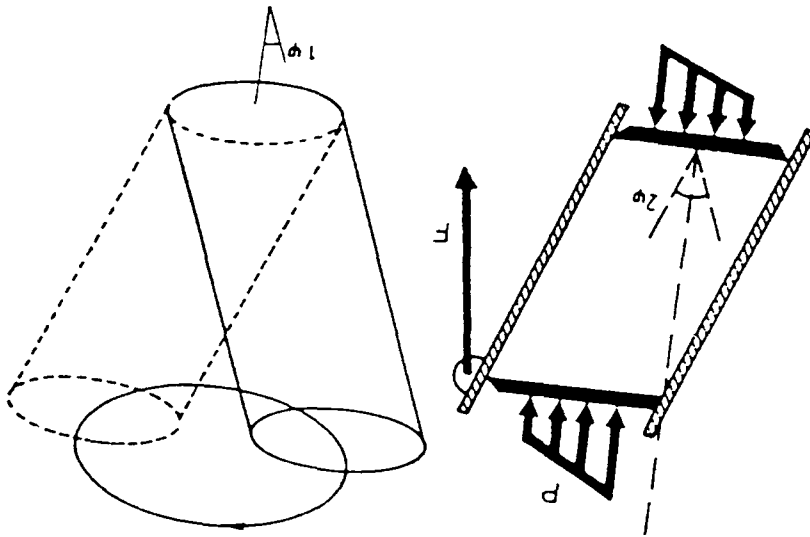
Dönerek Sıkıştırma: Paralel iki silindir tarafından numunenin her iki ucu tarafından sabit basınç uygulanırken, silindirik asfalt betonu numune sıkıştırma kalıbının dönme hareketine maruz bırakılarak sıkıştırılır (şekil 2.3).

Ana sakıncası, deney numunelerinin silindirik şekillerden farklı bir şekilde imal edilemeyeşidir. Yapılan çalışmalarda dönerek sıkıştırma işlevinin arazideki sıkıştırmaya uygun sonuçlar sunduğu neticesini çıkarmıştır. Bu çalışmada araziden inşa edildikten hemen sonra alınan karot numunelerin kayma ve rijitlik parametreleri ölçülmüş, daha sonra araziden alınan karotlarla birim hacim ağırlığı aynı olacak şekilde üretilen numuneler üzerine yapılan deneylerden de aynı sonuçların elde edilmesinden bu sonuca gidilmiştir. AAMAS çalışması sonucuna göre yoğurmalı sıkıştırma ve trafik altında sıkıştırma metodlarının her ikisi de araziye yeterli düzeyde temsil etmektedirler. Sıkıştırma metodlarının araziden alınan karotlara yapılan deneyler ile benzer sonuçları vermeleri açısından yapılan sıralama;

1. Dönmeli sıkıştırma (Gyratory-Shear Compaction),
2. California yoğurmalı (Kneading) sıkıştırma,
3. Taşınabilir çelik Teker Simulatörü,



Şekil 2.2 Sıkıştırma metodunun izafi karışım stabilitesine etkisi (Vallerga, 1951)



Şekil 2.3 Dönerek sıkıştırma metodunun çalışma prensibi (Bonnot, 1986)

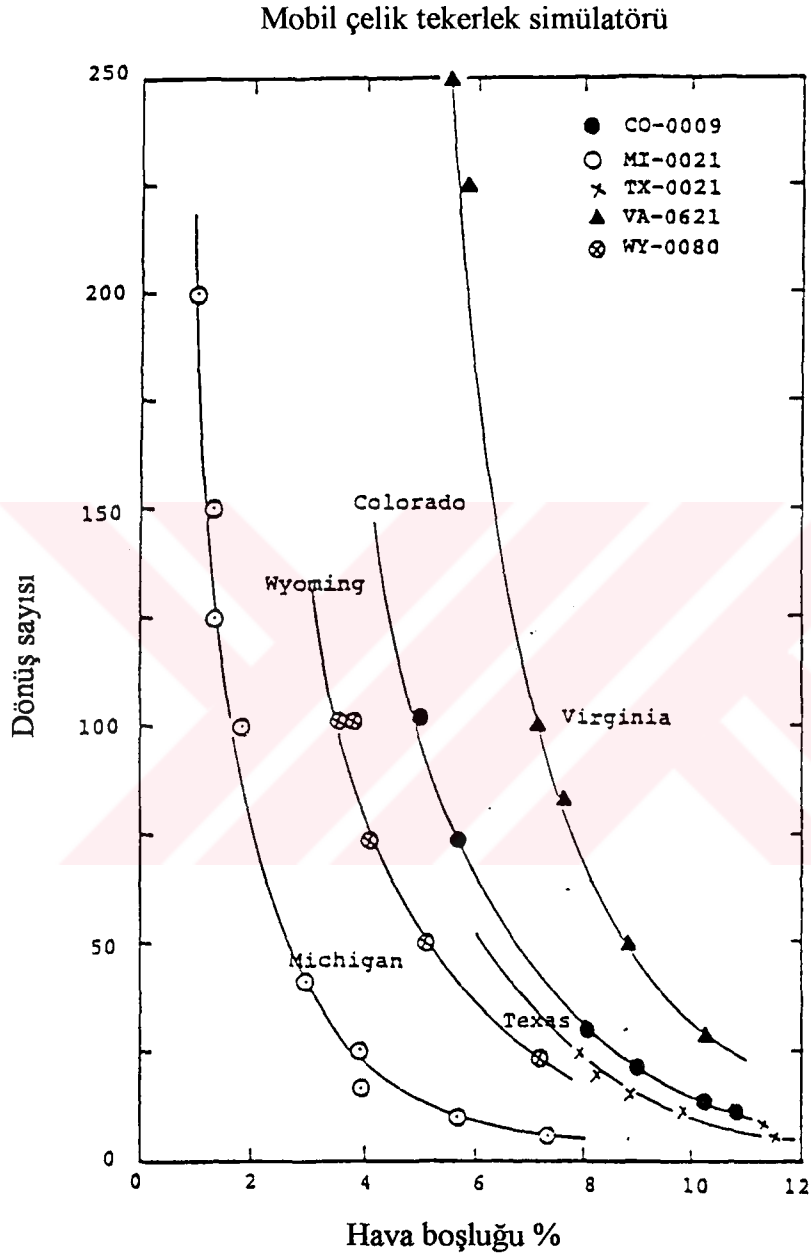
4. Arizona titreşimli yoğurma sıkıştırması,
5. Marshall tokmağıdır.

Trafik Altında Sıkıştırma: Trafik altında sıkıştırma, hemen hemen arazi ile aynı sıkıştırma durumudur (Van Quantis et al., 1988; Bannot, 1986; and Van Dijk, 1975). Bu tekniğin ana yararı agrega parçacıklarının yöneliminin ve karışımın yoğunluğunun arazideki sıkıştırma ile çok yakın olabilmesidir. Büyük ölçekli çalışma için gerçek boyutta karıştırma yapılmalıdır. Bu metodun sakıncası, büyük maliyetli özel ekipmanlara ihtiyaç göstermesidir.

Alternatif olarak diğer daha küçük sıkıştırma metodları olan bir çelik silindir (Brown and Cooper, 1984; Van Quantis et al., 1988) veya hava basınçlı lastik tekerde (Bonnot, 1986) değerlendirilebilir. Buna örnek olarak Laboratoria Central des Ponts et Chausees (LCPC) tarafından geliştirilen ve 100 mm kalınlık, 500 mm'ye 180 mm boyutlarında kabuk numuneleri sıkıştıran "trafik altında sıkıştırma" verilebilir. Yol metal çerçeveli ve çelik bir levha üzerine yerleştirilir. Sıkıştırma tekerleri (400 mm * 8 mm) arazideki sıkıştırmaya temsil edecek şekilde hava basıncına ve yüke sahip olacak şekil düzenlenmiştir.

Çelik-teker (trafik altında sıkıştırmanın) sıkıştırmasının bir örneği (NCHRP/AAMAS) çalışması içerisinde kullanılmıştır. Silindir-teker asfalt betonunun sınırlandırılmış kesimleri haricinde kalan serbest yüzeye basınç uygulayan bir düzendir. Sıkıştırma kuvveti arazideki sıkıştırma silindirlerini temsil edecek şekilde eğri bir ayak aracılığıyla uygulanır. Arazideki şartlara benzer şekilde kaba agrega parçacıklarının nisbi olarak serbest yüzeye doğru hareket etmesi sağlanır.

NCHRP/AAMAS çalışmasından alınan bilgiler Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Bu örnekte araziden alınan karot numunelerinin hava boşluğuna sahip numuneler üretebilmek için çelik ayakların devir sayıları kontrol edilerek kontrol-teker sıkıştırma yöntemi kullanılarak numuneler sıkıştırılmıştır.



Şekil 2.4 Değişik tipteki karışımlar için mobil çelik tekerlek simülâtörü ile hazırlanmış sıkıştırma gücü eğrileri (von Quintus et al.,1988)

Değerlendirme: Sıkıştırma işlemlerinin değerlendirilmesi neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Trafik altında sıkıştırma, yoğurmalı ve dönerek sıkıştırma metodlarında numuneler statik ve darbeli sıkıştırmaya göre arazi şartlarına daha uygun üretilmektedir.
2. Şekil 2.1 den de görülebileceği gibi Yoğurmalı Sıkıştırma asfalt muhtevasının belirlenmesine stabilitenin bulunmasında en büyük hassasiyete sahiptir. Dönerek ve trafik altında sıkıştırma metodları için bunu tespit etmek çok zordur.
3. Sıkıştırma yöntemlerinin yorulma üzerindeki etkisi ile ilgili olarak herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Eğer böyle bir çalışma yapılacak olursa trafik altında, yoğurmalı ve dönerek sıkıştırma metodları kullanılarak hazırlanan numuneler kullanılarak, sıkıştırma metodunun yorulma üzerindeki etkisi tespit edilmelidir. Deney numuneleri arazi şartlarını iyi bir şekilde modelleyecek şekilde seçilmelidir.

2.2.2.2 Yükleme modu

Yükleme modu yorulma direniminin laboratuvar deneyleri esnasında yük tekrarında gerilme ve deformasyon için tanımlanan sınırlamalardır. Ayrıca yorulma direnimide yükleme modunun bir fonksiyonudur. Kontrollü gerilme modunda yük ve gerilme genliği, Kontrollü deformasyon modunda ise yer değiştirme ve deformasyon genliği sabit kalmaktadır. Sıcaklığa (bundan dolayı rijitlik) bağlı olarak bu deneylerin sonuçları oldukça farklı olabilmektedir. Deney sonuçları karışım dizaynlarında yönlendirmektedir. Yükleme modunun araziye olan uyumu ile ilgili olarak da çalışmalar yapılmıştır (Monismith and Deacon, 1969 and Monismith et al., 1977).

Mod faktörünün kontrollü deformasyon durumu için +1 ve kontrollü gerilme durumu için -1 gibi bir değer alacağı farz edilir. Araştırmacılar iki yükleme modunun bir kaç

karakteristiğini değerlendirmiştir. Bununla ilgili olarak Tablo 2.1 'de kısa bir özet sunulmuştur.

2.2.2.3 Karışım değişkenleri

Seçilen karışım değişkenlerinin yorulma direnimi üzerinde olan etkisiyle ilgili olarak özet Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu tabloda özetlenmiş olan sonuçlar bir kaç referanstan yararlanılarak hazırlanılmıştır.

Genelde sürekli derecelenmiş karışımlarda yorulmayı asfalt muhtevası ve hava boşluğu muhtevası gibi iki faktör etkilemektedir. Agregası tipinin etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle de karışım içerisinde mümkün olduğu kadar çok asfalt ilave edilmesi yararlıdır. Stabilitenin nedeniyle katılacak asfalt muhtevasında bir sınır bulunmaktadır; ancak bu limit yorulma direnimini artıracak yakınlıkta olmalıdır. Ayrıca yorulma direnimini artıracak şekilde uygun sıkıştırma yapılmalı ve karışım inşa edildiği durumdaki dizayn yoğunluğuna sahip olmalıdır.

Sert asfalt (ısıdan dolayı oluşan çatlaklara karşı gerekli olan) ve yoğun gradasyonlu agrega ağır trafik yüklü üstyapılar (kalın tabakalı) için ve karışımın rijitliği gerekli olmaktadır.

Düşük ağır trafikli üstyapılar (ince kaplamalı) karışımlar mümkün olduğu kadar esnek yapılmalıdır. Bunun için düşük sertlikli asfaltlar ve daha açık gradasyonlu agrega kullanılır. Alternatif olarak Amerika'da kullanılan açık gradasyonlu karışımlar normal sürekli gradasyonlu karışımlara nazaran daha iyi yorulma direnimi vermektedirler (Freene et al., 1973).

Nicelik olarak asfalt ve hava boşluğu muhtevasının yorulma ömrü üzerindeki etkisi bir düzeltme faktörü ile soruşturulabilmektedir (Pell et al., 1975). Bu orantı;

$$\frac{V_B}{V_B - V_v}$$

Tablo 2.1 Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü yüklemenin kıyaslanması

DEĞİŞKENLER	GERİLME KONTROLLÜ (YÜKLEME)	DEFORMASYON KONTROLLÜ (DEFLEKSİYON)
Asfalt tabakası kalınlığı	Kalın asfalt tabakaları için	İnce asfalt tabakaları, < 3 inç
Kırılmanın tanımı, döngü sayısı	Numune kırılana kadar iyi tanımlanmış	Test süregelirken, keyfi
Yorulma test datası dağınıklığı	Az dağınık	Daha dağınık
İstenen numune sayısı	Az	Fazla
Uzun vadeli etkilerin simülasyonu	Yaşlanma sonucu rijitliğin artması ve muhtemel yorulma ömrü artışı	Rijitliğin artması sonucu yorulma ömrünün azalması
Yorulma ömrünün büyüklüğü	Genellikle kısa ömür	Genellikle uzun ömür
Karışım değişkenlerinin etkisi	Çok etkili	Az etkili
Enerji harcama oranı	Hızlı	Yavaş
Çatlak yayılma oranı	Arazideki değerden daha hızlı	Arazi koşullarını daha iyi temsil edebilme
Yorulma periyodunun faydalı etkisi	Çok faydalı etki	Daha az faydalı etki

Tablo 2.2 Asfalt kaplaması karışımının ve yorulma davranışına etki eden faktörler

Faktör	Faktördeki Değişim	Faktördeki değişimin etkisi		
		Rijitlikte	Gerilme kontrollü yüklemde yorulma ömrü	Deformasyon kontrollü yüklemde yorulma ömrü
Asfalt viskozitesi	Artınca	Artıyor	Artıyor	Azalıyor
Asfalt muhtevası	Artınca	Artıyor	Artıyor	Artıyor
Agrega gradasyonu	Gradasyon açılırsa	Artıyor	Artıyor	Azalıyor
Hava boşluk oranı	Azalinca	Artıyor	Artıyor	Artıyor
Sıcaklık	Azalinca	Artıyor	Artıyor	Azalıyor

V_B = Asfalt hacmi (%)

V_V =Boşluk hacmi (%) ve

$$V_B = \frac{[Pasf * Gasf * (1 - V_v)]}{[100 * Gasf + Pasf * Gag]}$$

Pasf=Agrega ağırlığının esas alan asfaltın ağırlıkça yüzdesi(%)

Gasf=Asfaltın birim hacim ağırlığı

Gag= Agreganın birim hacim ağırlığıdır.

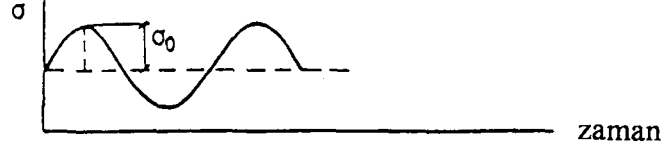
Santucci (1977) Pell ve Cooper (1975)'ın bilgilerini analiz etmiş ve California karışımları için laboratuvar çalışmalarının uygun olduğunu ve aralarında kabul edilebilir düzeyde bir ilişkinin var olduğunu not etmiştir.

2.2.2.4 Yük ve çevre değişkenleri

Yük ve çevre değişkenlerinin her ikisi de doğrudan ve dolaylı olarak etkendirler. Doğrudan etkilere örnek olarak laboratuvar ve deney sıcaklıklarında kullanılan yük tekrarı süre ve şekli dahil edilebilir. Şekil 2.5 ve Tablo 2.3'de laboratuvarında kullanılan genel yük şekilleri gösterilmiştir. Şekil 2.6'da ise farklı taşıt hızları için yüklenme zamanı ve bitümlü tabaka kalınlığı arasındaki ilişki verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi yüklenme zaman aralıkları için 0.04-0. Saniyelik bir sürenin alınmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.

Ağır trafik yüklü üstyapılar için karışım rijitliğinin artması diğer değişkenlerin sabit kalması durumunda yorulma ömrü artmaktadır. (Epps, 1969) gerçek trafik yüklerine maruz bırakılan numunelerin üstyapılarından alınan numuneler ile aynı kompozisyondaki laboratuvar numunelerinin yorulma performanslarını karşılaştırmıştır. Yaşlanma nedeniyle arazi karışımlarının rijitliği artmaktadır. Bunun da trafikten dolayı bozulma ve tabii durumdaki hava boşluğundaki yükselmenin etkisini dengelediği neticesini çıkartmıştır. Ancak yaşlanmadan dolayı asfaltın sertliğinin artması onun soğuk havalardaki kırılma direnimini (kırılmalık nedeniyle) azalttığı da belirtilmelidir. Epps'in çalışmalarının arazi ile ilgili olan bölümü soğuk bölgelerde

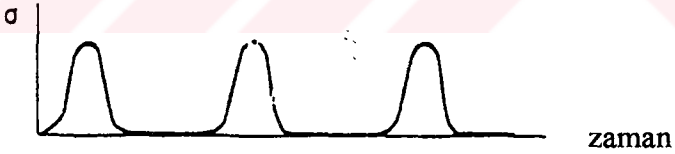
yapılmamıştır. Trafik nedeniyle oluşan sıkışmada yorulma direnimini etkilemektedir. Rainthby ve Ramshaw (1972) bulduklarına göre numunenin geniş deney plağının trafikten dolayı sıkışması verilen bir gerilme düzeyi için yorulma ömrünü ve dinamik rijitliğini %60 oranında artırmıştır. Rijitlikteki azalma ve hava boşluğundaki artışı da yorulma ömrünü etkilemektedir.



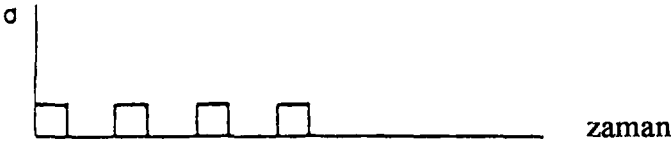
(a) sinüzoidal



(b) haversine



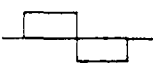
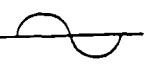
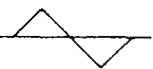
(c) dönmeli yükleme

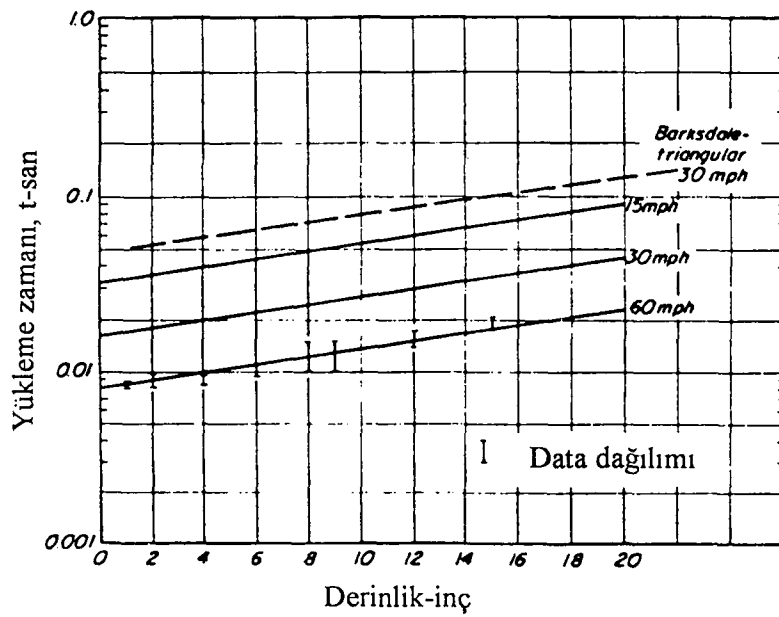


(d)

Şekil 2.5 Yükleme tipleri (Said,1988)

Tablo 2.3 Dalga şeklinin yorulma ömrü üzerine etkisi

Dalga şekli	Sıcaklık, °C	Gerilme Değeri MN/m ²	Başlangıç Deformasyon	Geometrik Yorulma Ömrü Ortalaması	İzafi ömür
	25	±0.33 (48 psi)	1.7×10^{-4}	24,690	0.42
	25		1.2×10^{-4}	58,950	1.0
	25		0.67×10^{-4}	85,570	1.45



Şekil 2.6 Yatay gerilme ile yükleme derinliği arasındaki ilişki

2.3 Değerlendirilen Bilgilerdeki Sınırlamalar

Yapılan çalışmalarda araştırmacılar tüm parametreleri aynı almamışlardır.(uygulanan yükün miktarı oldukça farklılık göstermektedir). Bunun için yorulma ile ilgili yapılan farklı araştırmaların sonuçlarının karşılaştırmak zordur. Bu nedenle sınırlı sayıda yapılan çalışma seçilmiş ve değerlendirilmiştir.

2.4 Yorulma Deney Metodları ve Gelişimleri

Tablo 2.4’de üç nokta yükleme, orta nokta yükleme, konsol eğilmeli, burulmalı konsol, tek eksenli, dairesel ve mesnetli eğilme durumları için yorulma deneylerinin temel karakteristikleri hakkında bir özet verilmiştir. Karakteristikleri ise yük konfigürasyonu, gerilme dağılımı, yük dalgasının şekli, yük frekansı, kalıcı deformasyonun oluşumu, gerilme durumu ve üniform gerilme zonunun görünümüdür. Bu tablodan tekrarlı dairesel yükleme deneyi ile diğerlerin farklılığı açıkça görülmektedir. Dairesel deney tek eksenli bir gerilme durumuna sahip iken diğer deneyler eksenel olmayan gerilme durumuna sahiptirler.

Burkulmalı konsol deneyi sürekli sinüzoidal yükleme şekline sahiptir. Eğilmeli deneyler tipik olarak kalıcı deformasyonları elimine eden tersinir yüklü veya yüksüz çeşitli vuruş şekillerinde (üçgensel, dairesel, v.d.) yapılırlar. Eksenel deneylerde dinlenme periyotlu veya peryodsuz sinüzoidal veya yarı sinüzoidal vuruşlar kullanılır. Dönen konsol ve eksenel deneylerde eğilmeli ve dairesel deneylere nazaran daha yüksek frekanslar kullanılmıştır. Üstyapı içerisinde dinlenme periyodu her bir yük vuruşunun uygulanmasından sonra oluşur. Sürekli yükleme modeli (dinlenme peryodsuz) daha kısa yorulma ömrü vermektedir. Bu nedenle de laboratuvar deneyleri daha hızlı bir şekilde tamamlanabilmektedir.

Yorulma deneylerindeki ana düşünce, numuneye tekrarlı yüklemeler altında elastik olmayan deformasyona izin vermektir. Servisteki trafik yükleri altında üstyapı karışımlarının yoğunluklarının artması, kayma kuvvetleri ve temelin oturmasından

dolayı elastik olmayan deformasyonlara maruz kalarak deforme olabilmektedir. Tüm bunlar ile birlikte projesine ve inşa yöntemlerine uygun olarak yapılan üstyapılarda kalıcı deformasyonlar çok az olmakta ve ayrıca bu deformasyonlar er veya geç (temelde olan oturmalarla birlikte oluşan) durmaktadır.

Bazı laboratuvar deneylerinde tersinir gerilme uygulanmaktadır. Bu da kümülatif deformasyonları azaltmakta veya bitirmekte ve arazideki trafik yükleri altındaki gerilme durumunu daha iyi temsil etmektedir. Diğer dairesel ve bazı aksel tip deneylerde ve mesnetli eğilme deneylerinde bu yapılamamaktadır.

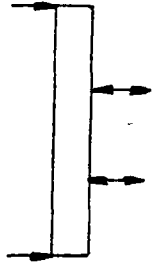
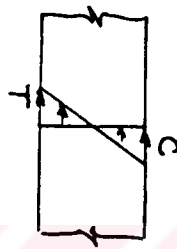


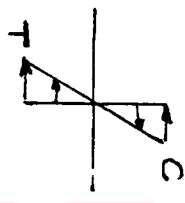

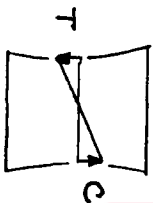

Laboratuvar deneylerinde tek vuruşlu yüklemekten daha çok üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerlek yüküne uygun üç nokta yüklemesi uygulanmaktadır. Kritik bölge olan asfalt betonu tabakanın tabanı, tekerlek yaklaşırken basınç gerilmelerine; sonra tekerlek bu nokta üzerinden uzaklaşırken çekme gerilmelerine maruz kalmakta ve sonuçta tekerlek uzakta iken basınç gerilmelerine maruz kalmaktadır. Tabakanın tabanındaki ilk basınç deformasyonunun büyüklüğü çekme deformasyonunun yaklaşık yedide birine eşittir (Raithby and Sterling, 1972). Bu basınç gerilmelerinin olmaması durumunda yorulma ömründe yaklaşık %10-15'lik bir artma meydana geldiği görülmektedir (Barksdale, 1977).

Detaylı literatür araştırmasının ardından yorulma deneylerinin kronolojik bir sıralaması Tablo 2.5'de gösterilmiştir.

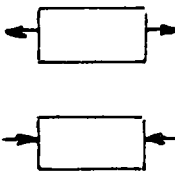
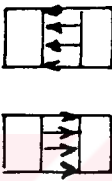

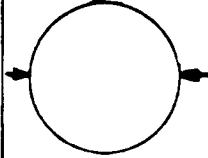
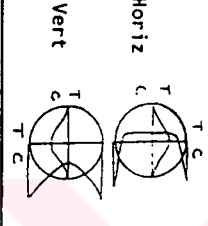
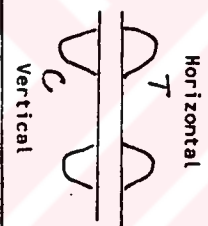

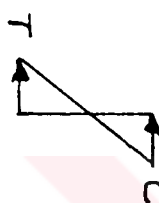

2.5 Üstyapı Dizayn Sistemi ve Yorulma Alt Sistemi:

Asfalt betonu kaplamalı üstyapılar karmaşık bir şekil arz etmektedir ve uygun bir üstyapı dizaynı çok karmaşık ve birbiri ile ilişkili faktörlere bağlı olmaktadır. Yakın zamanlarda üstyapı dizayn sistemini formüle etmek ve bütün bu faktörleri biraraya getirmek için sistem mühendisleri çalışmalar yapmaktadır. Şekil 2.7'de üstyapı dizaynında gerekli olan bütün faktörleri göstermektedir. Yorulma alt sistemi ise Kasianchuck tarafından şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Yorulma testi karakteristikleri özeti

Test	Yükleme Konfigürasyonu	Gerilme Yayılmı	Dalga Yükleme Tipi	Yükleme Frekansı	Performans Deformasyon var mı?	Gerilme Durumu	Kırılma Oluşuyor mu?
Üç Noktalı Eğilme			Haversine Load Rest - 1.9	1-1.67	Hayır	Tek Eksenli	Evet
Orta Noktalı Eğilme			Sine, Triangular Load Rest - 1:100 max	1:100	Hayır	Tek Eksenli	Hayır
Konsol			Sine (Borrot), Sine, Triangular Load Rest - 1:100 (van Dijk) max	25 (Borrot) 1:100 (van Dijk)	Hayır	Tek Eksenli	Hayır
Dönen Konsol				16.67	Hayır	Tek Eksenli	Evet

Tablo 2.4 Yorulma testi karakteristikleri özeti (Devamı)

Test	Yükleme Konfigurasyonu	Gerilme Yayılmı	Dalga Yükleme Tipi	Yükleme Frekansı	Performans Deformasyon var mı?	Gerilme Durumu	Kırılma Oluşuyor mu?
Eksenel				8.33-25.0	Hayır	Tek Eksenli	Evet
Dairesel				1.0	Evet	İki Eksenli	Hayır
Destekli Eğilme				0.75	Evet	Tek Eksenli	Hayır

Karışım Özellikleri:

Numunelerin karışım özellikleri aşağıda sıralanan kriterleri sağlamak amacıyla dikkatle seçilmelidir:

1. Stabilite
2. Durabilite
3. Yorulma direnci
4. Esneklik (Flexibility)
5. Kayma direnci
6. Geçirimsizlik (permeabilite)
7. İşlenebilirlik (workability)
8. Termal karakteristikler
9. Çatlama mukavemeti

2.5.1 Asfalt betonu kırışlarının tekrarlı eğilme altındaki davranışı:

Tekrarlı gerilmelerde asfalt betonu numunelerinin davranışı ve yorulma kavramı birçok araştırmacı tarafından değişik şekilde tanımlanmıştır.

ASTM' ye göre yorulma; "Malzemenin çekme mukavemetinden daha az değişken bir gerilmenin tekrarı ile bozulması olayıdır."

Tablo 2.5 Yorulma testi ve değerlendirmelerinin kronolojisi

YIL	ARAŞTIRMACI	TEST METOD VE KOŞULLARI	DEğERLENDİRME METODU
1989 Dr.Engg, UC Berkeley	Rao	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1989 OSU ve Oregon DOT	Scholz, Hicks ve Scholl	Dairesel	Gerilme kontrollü
1988 AAPT	Gerritsen ve Jongeneel	Konsol yükleme	Deformasyon kontrollü
1987 AAPT	Button, Little, Kim ve Ahmed	Eğilme	Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü ve bozulma mekanizması
1986 TRR 1096	Bonnot	Direkt gerilme ve konsol yükleme	Gerilme kontrollü
1985 AAPT	Monismith, Epps ve Finn	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü
1985 AAPT	Hugo ve Kennedy	Destekli diskler	Orta yükleme modu
1985 AAPT	Bjorklund	Destekli kirişler	Orta yükleme modu
1984 AAPT	Molenaar	Dinamik gerilme	Gerilme kontrollü ve bozulma mekanizması
1983	Little ve Richey	Dairesel	Gerilme kontrollü ve kırılma zarfı
1982	Bonnaure, Gravois ve Udron	Orta noktalı eğilme	Deformasyon kontrollü
1982 5. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Mahoney ve Terrel	Destekli kirişler ve yuvarlanan tekerlek yüklemesi	Orta yükleme modu
1981 AAPT	Whitcomb, Hicks ve Boonders	Dairesel	Gerilme kontrollü
1981 AAPT	Monismith	Üç noktalı eğilme	
1980	Bonnaure, Gravois ve Udron	Çeşitli uzmanların, temel test metodlarını içeren 146 yorulma eğrisinin regresyonu	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1979 AAPT	Ulidtz		Gerilme kontrollü ,bozulma mekanizması ve gözlemsel korelasyon faktörleri
1978 AAPT	Barksdale	Destekli kirişler	Orta yükleme modu
1977 4. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Classen, Edwards, Sommer ve Uge	Enerjinin sabitliği metodu	Gerilme deformasyonu limiti kriteri

Tablo 2.5 Yorulma testi ve değerlendirmelerinin kronolojisi (Devamı)

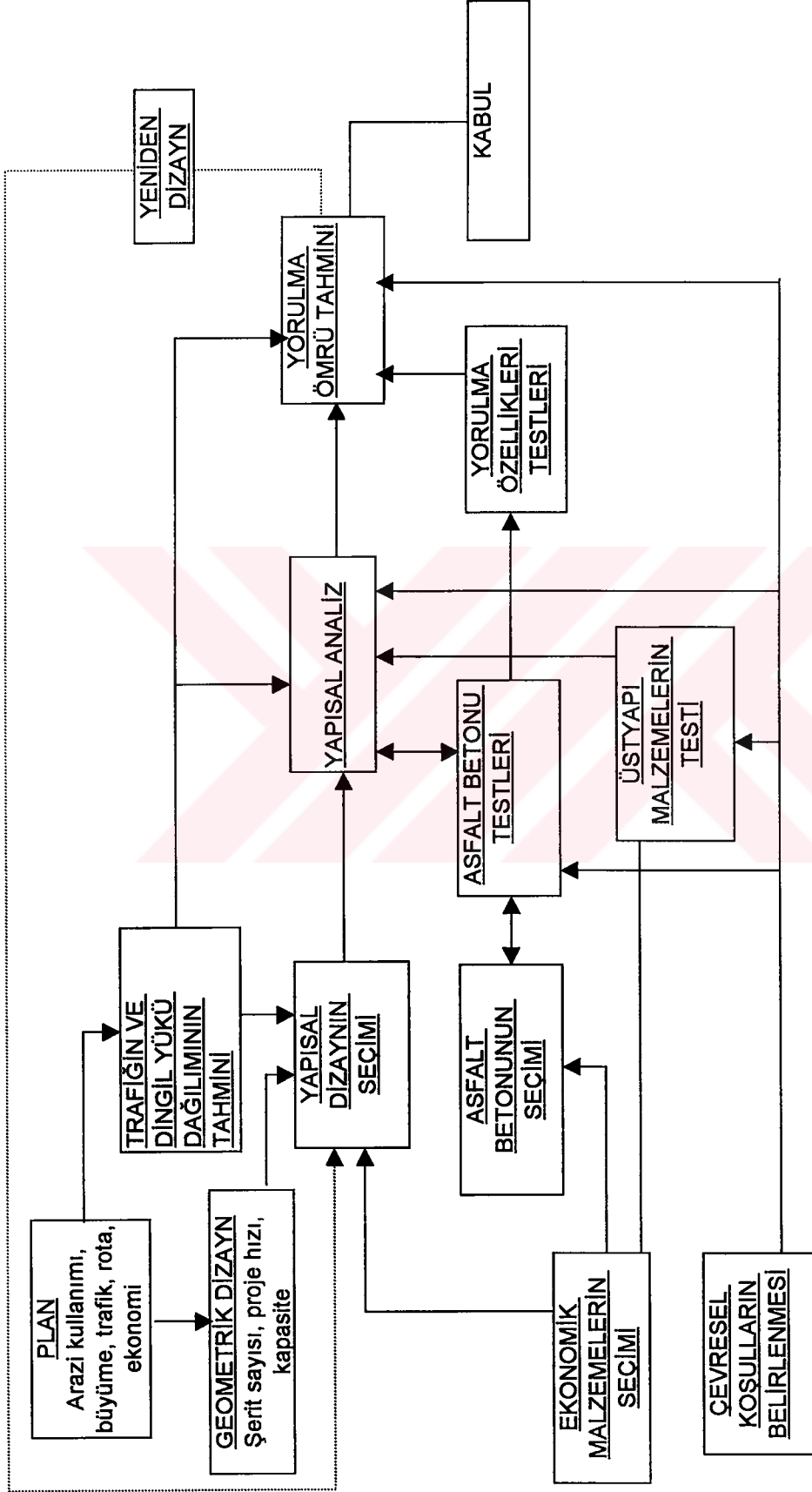
YIL	ARAŞTIRMACI	TEST METOD VE KOŞULLARI	DEğERLENDİRME METODU
1977 AAPT	Van Dijk	Konsol yükleme ve orta nokta yüklemesi	Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü, enerjinin sabitliği teorisi
1977 AAPT	Ruth, Gary ve Oslan	Eğilme ve Dairesel	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1977 AAPT	Kennedy	Dairesel	Gerilme kontrollü
GIT-7305	Barksdale	Destekli kirişler	Orta yükleme modu
1976 FHWA- RD-76-91 ve 92	Majidzadeh	Destekli kirişler	Bozulma mekanizması
1976 AAPT	Finn		
1975 AAPT	Pell ve Cooper	Döner eğilme ve eksenel yorulma	Gerilme kontrollü
1973 HRB zel raporu 140	Monismith	üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1973 HRB zel raporu 140	Barksdale ve Hicks	Tekrarlı yükleme plaka testi	Nümerik olarak karakterize etmek
1973 HRB zel raporu 140	Pell	Döner eğilme	Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü ile karŐılaŐtırmalı
1973 HRB zel raporu 140	Deacon		Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü ve sayısal metodlar
1973 HRB zel raporu 140	Finn	Servis kabiliyeti indeksi	Servis kabiliyeti ile çatılma derecesi arasında kurulan korelasyon
1973 HRB zel raporu 140	Terrel	Monismith, Kingham ve Kallas'ın çalışmalarından rnekler	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1973 HRB zel raporu 140	Witczak	AASHO yol testi sonuçları ve bilgisayar programları	Verilen yk tekerrrine denk gelen müsaade edilebilir deformasyon

Tablo 2.5 Yorulma testi ve değerlendirmelerinin kronolojisi (Devamı)

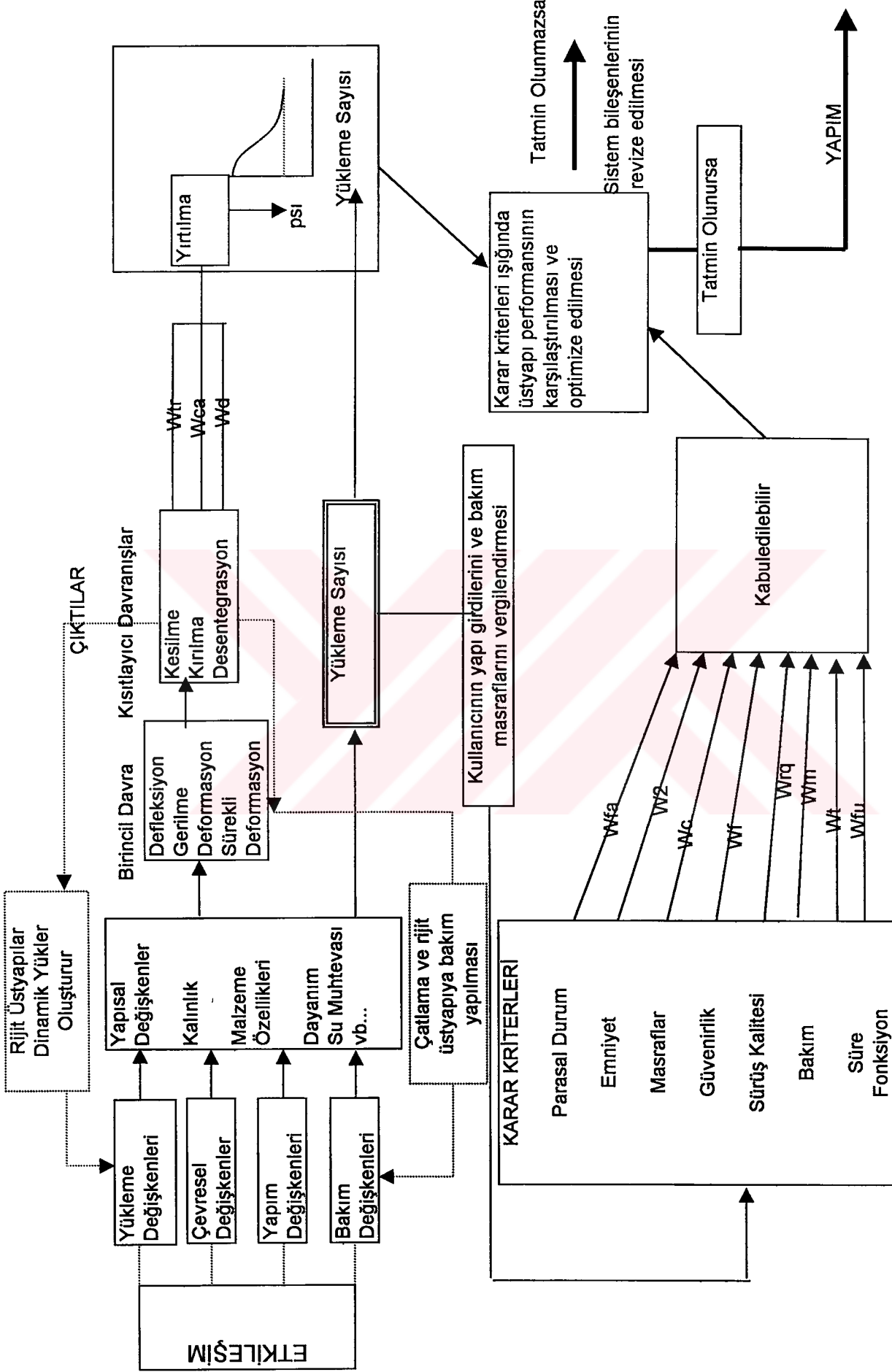
YIL	ARAŞTIRMACI	TEST METOD VE KOŞULLARI	DEğERLENDİRME METODU
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Bennot	Konsol yükleme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Kirk	 noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Witczak	Kingham'ın yorulma sonuçları, AASHO'nun tam derinlikli asfalt betonunun yorulma bağıntıları	Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu kriteri
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Kingham ve Kallas	Orta noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Van Dijk ve Moreaud, Quedeville ve Uge	Konsol veOrta noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1972 3. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Verstraeten	Konsol yükleme	Gerilme kontrollü
1972 RRL LR496	Raithby ve Sterling	Silindirik aksenal gerilme testleri	Gerilme kontrollü
1972 AAPT	Monismith ve Salam	 noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1971 Ph. D., Natal Üniv.	Freeme	Konsol yükleme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1969 AAPT	Pell ve Taylor	Dönmeli konsol yükleme	Gerilme kontrollü
1969 Ph. D., UC Berkeley	Epps	 noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1969 AAPT	Epps ve Monismith	 noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1969 AAPT	Santucci ve Schmidt	 noktalı eğilme	Deformasyon kontrollü

Tablo 2.5 Yorulma testi ve değerlendirmelerinin kronolojisi (Devamı)

YIL	ARAŞTIRMACI	TEST METOD VE KOŞULLARI	DEğERLENDİRME METODU
1967 2. Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Kallas ve Riley	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1967 HRR 158	Deacon ve Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1965 D. Engg., UC Berkeley	Deacon	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1964 TE- 64-2 ITTE, UC Berkeley	Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1963 TE- 64-2 ITTE, UC Berkeley	Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1962 Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Pell	Eğilme ve Bükülme	Gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü
1962 Intl Conf on Str Des of Asph Pavement	Jimenez ve Gallaway	Destekli kirişler	Orta modlu yükleme
1961 AAPT	Monismith, Secor ve Blackmer	Destekli kirişler	Orta modlu yükleme
1959 AAPT	Papazian ve Baker	Destekli orta nokta yüklemesi	Orta modlu yükleme
1958 AAPT	Monismith	Destekli orta nokta yüklemesi	Orta modlu yükleme
1955 HRB Bulletin 114	Hveem		
1953 AAPT	Nijboer ve Van Der Poel	Yol vibrasyonu aletleri	
1948 HRB	Hveem ve Carmany	Üstyapıda tekerrürlü yükler sebebiyle oluşan eğilmemeler	



Şekil 2.7 Yorulma alt sisteminin blok diyagramı



Şekil 2.8 Üstyapı sisteminin blok diyagramı

Saal ve Pell gerilme-kontrollü ve deformasyon-kontrollü deneyler üzerinde çalışmışlardır. Bu deneylerde şişe boynu şeklinde, uzunluğu 3" veya 6" , boyun kısmı minimum 1.25" ve gittikçe boyundan köşelere doğru artan çaplara sahip dairesel numuneler kullanılmıştır. Gerilme-kontrollü yükleme, dakikada 300-800 arası yükleme oranlarına sahip sinüzoidal gerilme zamanlı dönme tipli makinelerle yapılmıştır. Deformasyon-kontrollü deney cihazında ise aksenal yükleme yapılmamıştır. Dakikada 1450 döngü oranı ile yapılan yükleme sonucu sinüzoidal deformasyon-zaman eğrisi ve sarsıcı bükülme gerilmeleri elde edilmiştir. Yükleme tiplerinin yanında, karışım kompozisyonu, sıcaklık, boşluk oranı, asfalt tipi gibi birçok değişkeni incelemiş ve verileri ortaya konulmuştur.

1. Tüm sıcaklık ve yükleme oranlarında (çok yüksek gerilme düzeyleri hariç), uygulanan gerilmenin (σ) ve yükün tekrar sayısının logaritması arasında, doğrusal bir ilişki oluşmaktadır.
2. Yükün yükleme oranı ve sıcaklığın her ikisine de bağlı olarak σ - N_s doğrusal bir ilişki oluşmaktadır.
3. Yükleme sayısı N_s önemli derecede ısıya bağlıdır. Servis ömrünün büyük bir bölümünde rijitlik ve defleksiyonda değişiklik yoktur.
4. Yüksek sıcaklıklarda, çatlağın yayılmasından dolayı defleksiyonda çok daha büyük artışlar kaydedilmiştir.
5. Van Der Poel tarafından geliştirilen nomoğraflar ve uygulanan gerilme bilgileri kullanılarak hesaplanan deformasyon düzeylerinin logaritmasına karşılık yükün tekrar sayısının logaritması arasında bir lineerlik sözkonusudur.
6. Deformasyonun logaritmasına karşılık yükleme sayıları (N_s) çizgileri yüksek sıcaklıklarda ısıya bağımlı düşük sıcaklıklarda ise ısıdan bağımsız olduğu tespit edilmiştir.
7. Belirli deformasyon seviyeleri için yüksek sıcaklıklarda daha uzun servis ömrü ve daha küçük oranlarda çatlamlar görülmüştür.

8. Gerilme-kontrollü yüklemelerde, bir çatlak oluştuğunda çatlağın yayılmasına sebep olan gerilmeler artar ve bu çatlak yayılmaları ani olarak gelişir. Deformasyon-kontrollü yüklemelerde, bu gerilmeler çatlaklar oluşuktan sonra belirgin şekilde azalır, böylelikle çatlak yayılımı daha azdır.

9. Tekrar sayısı ile uygulanabilir birim deformasyon arasındaki ilişki şöyledir:

$$N=C(S/\sigma)^a \quad 10^4 < N < 10^8 \quad \text{veya} \quad 2.5$$

$$N=C(1/\epsilon)^a \quad 2.6$$

N: Bozulmaya sebep olan tekrar sayısı S: Karışımın rijitliği

σ : Eğilme gerilmesi a: Sabit (Saal ve Pell 5 veya 6 önermişlerdir.)

ϵ : Deformasyon c: Sabit

10. Yüksek boşluk oranlarında daha düşük yorulma ömrü, başka bir deyişle yoğun numuneler daha uzun yorulma ömrüne sahiptir. Monismith, et al., bu sonuca katılmakla beraber çok önemli bir cümle daha ekliyor:

“Bununla beraber, çok açıktır ki bu sonucun geçerli olabilmesi için karışım içerisinde yeterli düzeyde asfalt olması gerekmektedir. Veriler incelendiğinde görülecektir ki düşük sıcaklıklarda karışım katı olmasına rağmen, az asfalt içeren karışımlarda bozulma görülmektedir.”

Heukelom ve Klomp (Prof. Dr. Rüşü Yüce, Doktora tezi), dinamik yüklemeler altında bitümlü karışımların deformasyonlarını incelemişlerdir. Yorulmayı; “çevresel etkiler sonucunda sürekli değişimlerin yığılımlı olarak toplanıp, uygulanan gerilmenin , gerilme dayanımına eşit olmasını sağlayan durum” olarak tanımlamışlardır. Tekrarlanan trafik yükleri altında yol üstyapısında oluşan yorulma deformasyonları üzerinde durmuşlar, ve gerilme, deformasyon, elastisite modülü ve tekrar sayıları

arasındaki ilişkileri tahmin etmeye yarayan çok faydalı abaklar geliştirmişlerdir. Bu makalelerinden alıntı yapacak olursak:

“Düşük ısılarda ve kısa yükleme zamanlarında asfalt bitümü gevrekler, bununla birlikte yüksek servis sıcaklıklarında ve uzun yükleme zamanlarında çok daha fazla deformasyon görülmektedir. Tekrar eden trafik yükleri ile birlikte, yorulma deformasyonları en ilgi çekici özelliklerden biri olmaktadır. Daha aşağı servis sıcaklıklarında ve dinamik yüklemelerde “yorulma deformasyonu” en önemli üstyapı dizayn kriteridir.”

Monismith 1958'den itibaren başladığı yoğun araştırma programları sonucunda, aşağıdaki değişkenleri kullanmıştır.

1. 3 farklı sıcaklık 40°F , 68°F ve 75
2. Boşluk oranı % 3.5 - % 7.0 arasında
3. 3/8” ve 0.5” lik maksimum agrega boyutu
4. % 4 ila % 7 arasında asfalt muhtevası (son yıllarda % 6 olarak kabul edilmektedir.)
5. Dakikada 3, 5, 30 ve 100 yükleme oranları (Günümüzde dakikada 100 yükleme oranı ve 0.1 saniye yükleme süresi kullanılmaktadır.)
6. Gerilme-kontrollü ve deformasyon-kontrollü yükleme tipleri
7. Tek ve birleşik yükleme koşulları

Monismith asfalt betonu karışımlarının davranışına bağlı olarak “yorulma direnci” adında yeni bir terim geliştirmiştir. Yorulma direnci kırılma modülündeki azalma ile ilişkilidir, küçük miktardaki bir düşüş büyük yorulma direncini beraberinde getirmektedir. “Yorulma direnci” ayrıca numunelerin çatlamaya karşı direnme kabiliyeti olarak tanımlanabilir.

Monismith'in çalışmalarından elde edilen sonuçların özeti aşağıda verilmiştir:

1. Yoğun gradasyonlu karışımların yorulma direnci küçük yüklemeler için daha büyük olurken, artan yükleme düzeylerinde yüksek asfalt içerikli olmak kaydıyla sabit olmaktadır.
2. Aynı yükleme seviyelerinde, açık gradasyonlu karışımlar yoğun gradasyonlu karışımlara oranla daha az yorulma direncine sahiptir.
3. Açık gradasyonlu numuneler daha büyük defleksiyon göstermekle birlikte yoğun gradasyonlu numunelere oranla daha küçük rijitlik değerlerine sahiptir.
4. Yeterli miktarda asfalt karışımında mevcut ise, daha rijit karışımlar için daha uzun servis ömrü elde edilmektedir.
5. Deformasyonun logaritmik çizimi ile servis ömrünün logaritmik çizimi lineerlik göstermektedir.
6. Verilen bir deformasyon düzeyinde herhangi bir karışım için yapılan testte servis düzeyinin 75⁰F'da, 40⁰F oranla daha fazla olduğu görülmektedir.
7. Daha az boşluk oranı olan numuneler için daha büyük servis ömrü elde edilmiştir.
8. Yorgunluk direnci % 4 den 7'ye doğru artan asfalt muhtevasıyla daha da artmaktadır.
9. Değişik tipte asfalt ihtiva eden numuneler benzer deformasyon ve servis ömrü ilişkileri göstermektedir.

Monismith yükleme koşulları ve yükleme tipleri üzerinde hassasiyetle durmuştur. Bu konuyu raporunda şöyle açıklamıştır.

“ Test edilecek numuneye ait farklı yükleme şekilleri için servis ömrü veya çatlak ömrü tarifi yapılabilir. Servis ömrü süresince yükleme koşulları değiştirilmezse, numunenin basit yüklemeye maruz bırakıldığı söylenebilir. Eğer yükleme koşulları

tekrar eden gerilmelerle değiştirilirse (prosedüre uygun olarak) numunenin birleşik yüklemeye maruz bırakıldığı söylenebilir. En son bahsedilen yükleme sadece gerilmedeki değişiklikleri değil çevresel etkilerini de (ısı gibi) içermektedir.”

Yükleme tipleri, gerilme ve deformasyon düzeylerinin yorulma yüklemesi esnasında nasıl değişim gösterdiğini açıklamak için kullanılmaktadır. Eğer itibari gerilme ve yükleme düzeyi servis ömrü süresince sabit tutulursa, test gerilme-kontrollü veya kontrollü tipte denilmektedir. Eğer itibari deformasyon düzeyi sabit tutulursa, test deformasyon-kontrollü veya defleksiyon-kontrollü tipte denilmektedir.

Monismith ve Deacon iki yükleme tipi arasındaki farkı sayısal bir parametre ile ortaya koymuşlardır (Yükleme tipi modu). Bunu yapmalarındaki amaç, iki yükleme tipinin verdiği sonuçların birbirleriyle çelişir gibi görünmesiydi. Raporlarında bundan şöyle bahsetmişlerdir:

“Deformasyon kontrollü testlerde karışımın rijitliği önemli bir parametre olarak göze çarpmaktadır. Karışım ne kadar rijit olursa, yorulma ömrü, belirli bir deformasyon seviyesinde, o kadar kısa olur. Bunun yanında gerilme-kontrollü testlerde, karışım ne kadar rijit olursa belirli bir gerilme düzeyinde yorulma ömrü o kadar artar.

Bundan dolayıdır ki kişi karışımını deformasyon-kontrollü testlerden çıkan sonuçlara göre projelendirirse, daha yumuşak nitelikte bir asfalt kullanmayı tercih edecektir. Gerilme-kontrollü testleri baz alarak hareket edecek olursa, sonuçlar kullanıcıyı sert asfalt karışımını tercih etmesine sebep olacaktır.

Monismith ve Deacon “Yükleme tipi faktörünü” şöyle tanımlamıştır:

$$MF = \frac{A - B}{A + B}$$

2.7

MF: Yüklemeye tipi faktörü

- A: C yüzdesi kadar rijitlikteki azalmaya isabet eden % gerilme değişimi
 B: C yüzdesi kadar rijitlikteki azalmaya isabet eden % deformasyon değişimi
 C: Keyfi ama sabit rijitlik azalma yüzdesi

Gerilme-kontrollü yükleme tipinde, yükleme tipi faktörü (-1) değerini alırken deformasyon-kontrollü yüklemelerde bu değer (+1) olmaktadır.

Monismith asfalt karışımının yorulma özelliği üzerinde istikrarlı araştırmaları sonucunda esnek üstyapılarda ince asfalt betonu için (2" veya daha ince) deformasyon-kontrollü yükleme tipini önerirken, daha kalın asfalt betonu için (6" ten kalın) gerilme-kontrollü yükleme tipinin uygulanması gerektiğini söylemiştir. Geri kalan kalınlıklar için bu iki tip yükleme arasında bir deneyi uygulamayı önerirken, gerilme-kontrollü yüklemenin yorulma özelliğini çok iyi ve gerçeğe yakın tahmin edebilmesi gerekmektedir. Bu referansla Monismith tablo 2.6 de yorulma özelliğini etkileyen değişkenleri ortaya koymuştur.

Deacon yorulmayı, “ Malzemede şartlara bağlı olarak gittikçe ilerleyen lokal ve sürekli olan değişikliklerdir ki, belirli nokta veya noktalarda değişken gerilmeler ve deformasyonlar oluşturur ve yeterli yüklemelerden sonra çatlak veya komple bir kırığa sebep olur. “ diye tanımlamıştır. Deacon “ Kümülatif hasar hipotezi ” üzerinde durarak “ döngü oranlarının lineer toplamları “ kavramını geliştirdi:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad 2.8$$

n_i : i. Deformasyon ve gerilme düzeyinde ki uygulama sayısı

N_i : i. Deformasyon ve gerilme düzeyinde ki, basit gerilmelerde kırılmaya sebep olan yükleme sayısı

Tablo 2.6 Yorulma özelliğine etki eden laboratuvar test değişkenleri

YÜKLEME DEĞİŞKENLERİ	KARIŞIM VE NUMUNE DEĞİŞKENLERİ	ÇEVRESEL DEĞİŞKENLER
1. Gerilme tipi	1. Asfalt	1. Sıcaklık
2. Gerilme düzeyleri	a. Tipi	2. Nem
3. Test metodu	b. Sertliği	3. Malzeme özelliklerinin servis ömrü süresince değişimi
A. Yükleme tarihçesi	2. Agregası	
a. Basit yükleme	a. Tipi	
b. Bileşik yükleme	b. Granülometri	
B. Yükleme Tipi	3. Numune	
a. Gerilme-kontrollü	a. Asfalt hacmi	
b. Deformasyon-kontrollü	b. Hava boşluğu hacmi	
c. Orta dereceli	c. Rijitlik	

Deacon'ın vardığı dikkat çekici bazı sonuçlar şunlardır:

1. Bitümlü numunelerin yorulma davranışı üzerinde yükleme tipinin çok önemli bir etkisi vardır. Tekrarlı gerilme-kontrollü yüklemelerde en büyük rijitlik değerine sahip numune, kırılma ömründe en tatminkar neticeleri verirken, deformasyon-kontrollü deneylerde bunun tam tersi olmaktadır.
2. Başlangıç defleksiyon-bazlı rijitlik modülü, numunenin özgül ağırlığı ile bağlantılıdır; yüksek özgül ağırlığa karşılık yüksek başlangıç rijitlik modülü denk gelmektedir.

3. Bunun yanında yüksek özgül ağırlığa sahip numuneler daha uzun kırılma ömrüne sahip olma eğilimindedirler (gerilme-kontrollü deneylerde).
4. Başlangıç rijitlik modülü yorulma davranışındaki bir kısım değişkenleri açıklamakta kullanılabilir. Bununla birlikte kırılma ömrüne karşılık, başlangıç deformasyon düzeyi formunda çizilen bir grafikte (basit yüklemeli, deformasyo-kontrollü yükleme tipinde), kırılma ömrüne karşılık gerilme-kontrollü yüklemeye oranla daha az bir dağılım göstermektedir. Genelde yüksek bir başlangıç modülüne karşılık daha yüksek bir kırılma ömrü karşılık gelmektedir.
5. Gerilme-kontrollü basit yükleme tipi için, kırılma ömrünün standart sapması, gerilme düzeyinin logaritması ile lineer bir ilişkiye sahiptir.
6. 78.5 pound/inch² üstündeki uç-fiber gerilmeleri için, 0.1 saniye yükleme süresi ve 75° F ısıda, defleksiyon-bazlı rijitlik modülü, gerilme düzeyinin bir fonksiyonudur; düşük gerilme düzeyleri için daha büyük modül değerleri bulunmuştur.
7. Bu çalışmanın deneysel verileri temel alınarak, şu görülebilir ki, eğer rasgele yüklemeye ait uygulanan çeşitli gerilme düzeylerinin olasılıkları uygulama yüzdelere eşitse, rasgele ve tekrarlı blok yüklemelerine ait ortalama kırılma ömürleri için yükleme geçmişi çok önemli olmaktadır.

2.5.2 Asfalt betonu tabakalarının tekrarlı yükler altındaki davranışı:

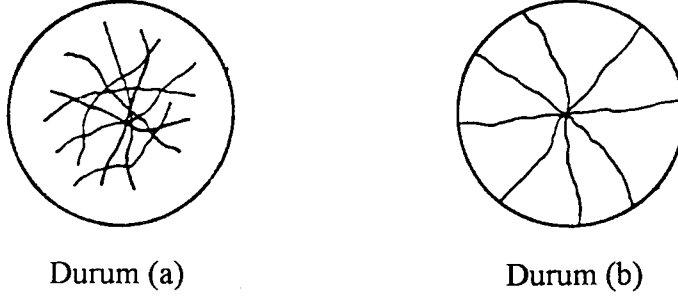
Thomas 16" çapındaki asfalt betonu numunesini merkezci yüklemeye altın deney aletiyle ($k=300\text{lb/cu.in}$) teste tabi tutmuşlardır. Thomas, daha rijit karışımların yüksek değerlerde yük dağıtma özelliğine rağmen, çatlağa karşı daha hassas oldukları ve çatlakların radyal yönde dağıldığı sonucuna varmıştır.

Goetz, Mc. Laughlin ve Wood yaptıkları çalışmada, numunelerin fiziksel yapılarının görünüşlerinin bizi şu sonuca götürdüğünü söylemektedir: Kümülatif sürekli deformasyona karşı tekrar yükleme sayısının logaritmik grafiği, verileri en güzel şekilde ifade etmektedir.

Mc. Laughlin yükleme yapılan alanın numunenin ölçülerine oranının asfalt betonunun yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak için yaptığı çalışmalarda, rijit olarak desteklenmiş numunenin alanının yükleme alanına oranı yükseldikçe numunenin yük taşıma kapasitesinin yüksekliği (oran 10 değerine ulaşına dek), daha sonra tabakanın dayanımının sabit kaldığı gözlemlenmiştir

Rudolf. A. Jimenez asfalt betonu tabakasının esnekliğini ve çatlamaya karşı dayanımını değerlendirmek için “Texas Transportation İnstitute” da “defloktemetre” isimli bir ölçü cihazı geliştirmiştir. Yaptığı çalışmalar neticesinde 17.5 inç çapındaki asfalt betonu tabakasında kırılmanın “belirli bir sayıdaki yüklemeler sonunda” aşağıdaki bir veya birkaç değişim kombinasyonunun ortaya çıkması ile meydana geldiğini söylemiştir.

1. Destek basıncı maksimuma değere ulaşip sonra düştüğünde
2. Ölçü cihazının bir noktadaki defleksiyonun tam ters istikamete döndüğünü belirtmesiyle
3. Yükleme gösteren kadranın hareketinin kararsız oluşu
4. Logarimik koordinatlarda yükleme ayağının defleksiyonuna karşı çizilen, tekrarlı yük sayısı diyagramının düz bir çizgi oluşturduğu çatlama tipine göre 85-100 penetrasyon değerine sahip asfaltlarda 2 durum gözlemlenmiştir.
 - a) Çatlakların şekli, hizmette olan asfaltlarda aynı özellikleri göstermektedir ki poligon oluşturacak şekilde birleşmişlerdir.
 - b) Ortadan birleşen birincil çatlaklar. Bu tür çatlaklar asfalt film tabakasının çok kalın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.9 Çatlak şekilleri

Housel yapısal sistem içerisindeki hasar problemine iki şekilde yaklaşmıştır: Basit çatlama ve sürekli deformasyon. Çatlamanın tekrarlı yükler sonucunda oluştuğu ve sürekli deformasyonunsa hacimsel deformasyon ile üstyapı sisteminde kesme bükülmeleri sonucu oluştuğunu söylemiştir.

Nijboer ve Van Der Poel asfalt yoldaki çatlakların malzemenin yorulma direncini aşan hareketli trafik yüklerinin oluşturduğu eğilme gerilmelerinden meydana geldiğini söylemişlerdir.

Chandrangsu elastik destekler üzerindeki uzun asfalt kirişleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmanın amacı; farklı rijitlik değerine karşılık gelen destekler üzerindeki defleksiyon profillerini incelemek ve defleksiyonda yükleme tekrür sayısı arasında bir bağıntı kurmaktır. Kiriş numuneler üzerinde uygulanan toplam yükleri, destek reaksiyonları ve destekteki defleksiyonlar ile tanımlamaya çalışmışlardır.

$$P = \sum_{i=1}^{i=7} k_i \cdot y_i$$

2.9

k_i : Destek reaksiyon modülü (pound / inç)

y_i : Desteğin defleksiyonu (inç)

Chandrangsu'nun yorulmayla ilişkili olarak vardığı temel sonuç şudur: Kirişin defleksiyonu, uygulanan yüklerle lineer bir dağılım göstermekte, zayıf desteklerdeki kirişler daha rijit destekli olanlara oranla çok daha fazla tekrarlı yüklere kırılmadan dayanabilir. Bu sonuçlar Papazian ve Baker'in eriştiği sonuçlara benzemektedir.

Majidzadeh ve Ramsamooj elastik temel üzerinde duran kum kağıdı asfalt tabakaları ve asfalt betonu kirişleri üzerinde bir seri testler yapmışlardır. Çatlakların yayılması neticesinde oluşan defleksiyon, gerilme, ayrıca yükleme şiddeti faktörü, çatlak yayılma oranı gibi parametrelerin deneysel ve teorik değerleri arasında bir korelasyon kurmak için incelemeler yapmışlardır. Bunun sonucunda yorulma problemi için bir analiz metodu ve çok tabakalı üstyapı sistemi önermiştir.

Araştırmacılar yorgunluk olgusunu, asfaltlı sistemlerde çatlakların başlaması ve büyümesi olarak; yorgunluk ömrünü ise başlangıç sürecini kritik ölçülerdeki bir veya birkaç çatlığa çeviren tekrarlı yük devinimi olarak tarif etmişlerdir. Yorulma hasarının daha ilk yüklemeden itibaren başladığına inanıp çatlığın muhtemel yayılma tiplerini açıklamışlardır. Raporlarında bu hususlar şöyle geçmektedir:

“ Fiziksel koşullardan ve çatlığın büyümesini yöneten temel faktörlerden yola çıkarak, çatlığın yayılma tipi önceden belirlenmelidir. Böylece yüksek gerilme konsantrasyonu olan bütün noktalarda çatlaklar başlayacak ve maksimum temel gerilmeye dik olarak yayılacaktır. Bununla birlikte, bazı durumlarda enerji ihtiyacı yöndeki enerjiden daha az olduğunda çatlak dallanabilir. Eğer çatlak orijinal yoluna dönerse, stabil (sabit) olarak isimlendirilir, aksi sözkonusu olduğunda labil (karasız) olarak isimlendirilir.

Bu çizgi ile bağlantılı olarak oluşan ilk çatlak, yüklemenin tam merkezinden başlayacak (gerilme baskısının maksimum olduğu nokta) akışın en kritik noktasında tabakaların ve temelin yanında ve yüzeyinde, radyal yönde büyüyecek, bu büyüme tanjant basıncını, tüm noktadaki ara basınçlardan daha büyük olana kadar sürecektir (yüklemenin yapıldığı yerde her ikisi eşit olduğunda hariç tutulmuştur.).

Deneysel olarak gözlemlenmiş bir gerçek şudur ki: Kırılma düzlemi genellikle en büyük gerilmeye dik yönde olmaktadır, böylece açılma şekli diğer şekillere göre daha hızlı gelişmektedir.

Şekil 2.8 ve 2.9 Majizadeh ve Ramsamooj'un geliştirdiği muhtemel çatlama yayılmasını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ara kesitte çatlak yarım daire yarım eliptik biçimdedir. Bu tip çatlama için şunu söylemişlerdir.

“Başlangıç akışı yarım penny şeklinde olduğunu kabul ettiğimizde çatlağın derinlik ve uzunluk olarak elips düzleminde büyüebileceğini söyleyebiliriz. İlk aşamada çatlak yüzeye ulaşır ve daha sonra çatlak boyunun, derinliğine oranı gittikçe artmasıyla, çatlağın uzunluğu hakim ölçü olur ve buna derinlemesine çatlak denir.

Majidzadeh ve Ramsamooj defleksiyon, yıpranma ve çatlak yayılımı tipi için yaptıkları testlerde şu sonuçlara ulaşmışlardır:

1. Plaka eğilmesinin klasik lineer eşitliğinden elde edilen teorik defleksiyonlar, kalın tabaka testlerinden elde edilen defleksiyonlarla çok uyumlu görülmektedir.
2. Deneysel gerilmeler teorik yüklemelerden % 20 daha küçük olmaktadır. Bu ise deney aletlerinin sabitlendiği alan üzerine uygulanan epoksi çimentosunun rijitliğinden kaynaklanmaktadır.
3. 2000 ile 4000 arasındaki tekrarlı yüklemelerde defleksiyonlarda hızlı bir artış görülmesine rağmen, tabakada hiç bir çatlama olmadığı görülmüş, bazı visko-elastik sebeplere, neme ve gerilme artmasına bağlı olduğu gözlemlenmiştir.
4. Başlangıç defleksiyonlarının dışında, diğer artan defleksiyonlar numunenin alt yüzeyinde oluşan çatlaklarla ilişkilidir. 600.000 döngülü bir testin 80.000 döngüsünde bu çatlaklar x-ışınlı fotoğraflarla net bir şekilde belirlenmiştir.
5. X-ışın fotoğraflarında tesbit edilen ilk çatlak grubu 4 ana çatlaktan bazen 3 veya 5 çatlakta oluşmaktadır. Genellikle yaklaşık olarak eşit uzaklıklıdır. İlk çatlak grubu

birincil çatlama tipi olarak isimlendirilmiştir. Bunun yanında birincil çatlama tipinin yayılması, diğer ana çatlak grubunun bu çatlaklara yarı mesafe yakınında oluşmasıyla yavaşlamaktadır. Bu ikinci çatlak tipleri de dipten yukarı doğru oluşan çevresel çatlakların yayılması ile birlikte azalmaktadır. Şekil 2.10 çatlak yayılma tipini göstermektedir.

6. En sonunda tabakanın merkez bölümü geri kalan bölümlerden ayrılmıştır ve devam eden yükleme sonucunda artık hiçbir defleksiyon görülmemektedir.
7. Çoklu çatlaklara sahip çatlaklardaki çatlak yayılmalarının analizi, zor bir problemdir. Bununla birlikte çatlak ve uç gerilme alanlarının bağımsız olduğu söylenebilir. Bu teorik açıdan da şaşırtıcı bir sonuç değildir, çünkü çatlakların gerilme alanları, çatlağın kendisinden daha küçük bir yarıçapa sahip bir zonla sınırlanmıştır. Daha genelleştirecek olursak, çatlakların en az bir radyan ötede olmak şartıyla, çatlak uç gerilme alanları bağımsız olacağı kabul edilmektedir.

Secor elastik temel üzerinde oturan asfalt tabakalarının visko-elastik davranışlarını incelemek üzere deneyler yapmıştır. Birleşik visko-elastik katsayısını bulmaya çalışmış, bunun yanısıra merkezci yüklemeye altındaki defleksiyon ile teorik değerlerin karşılaştırmasını yapmış ve her ısı seviyesine denk gelen Poisson oranını bulmuştur. Laboratuarda ölçülen defleksiyon değerleri ile teorik değerlerin birbirlerinden farklı olduğu sonucunu elde etmiştir, ve bu sapmanın sebeplerini ve sonuçlarını şöyle açıklamıştır:

1. Asfalt çimentosu ve asfalt karışımlar visko-elastik malzeme olarak ele alınabilir.
2. Visko-elastik malzemeler için sabit bir Poisson oranı kabulü doğru olmayabilir, fakat bu oran zamanın fonksiyonu olarak formülüne edilirse kabul edilebilir. İstenilen sıcaklık düzeyine denk gelen Poisson oranı değerleri sabit oranlı gerilme testlerinden elde edilen genişleme değerlerinden yola çıkılarak tahmin edilmiştir. Bu aşağıdaki formül işe sağlanmıştır:

$$e = \frac{1 - 2 \cdot \gamma}{E} \vartheta$$

e: Hacimsel genişleme

γ : Poisson oranı

E: Elastisite modülü

\mathcal{S} : $\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$

Bu eşitlik tam anlamıyla ancak izotrop elastik malzemelerde uygulanabilir. Bununla birlikte Poisson oranını çeşitli ısı derecelerinde bulabilmek için bir yaklaşım sağlaması açısından bu formül kullanılmıştır.

<u>Isı</u>	<u>Poisson Oranı</u>
40 ⁰ F	0.35
77 ⁰ F	0.49
140 ⁰ F	0.50

3. Visko-elastik teori ile gerçekte ölçülen defleksiyon değerleri arasında önemli bir sapma olmasına rağmen, teorik değerlerin tümünden geçersiz olduğu söylenemez. Tahmin edilen defleksiyon eğrileri ile data eğrileri karakteristikleri birbiriyle aynı olmasına rağmen ana uyumsuzluk defleksiyonun mutlak değerlerinin farklı olmasıdır. Unutulmaması gereken bir noktada şudur ki , elastik tekniklerde, bu gibi analizlerdeki uygulamalarda spesifik yükleme durumları için , bir grup defleksiyon değerleri elde edilebilir. Zamana bağlı olarak bizim için gerekli olan defleksiyon değerlerini elde etmek mümkün değildir. Buna rağmen, visko-elastik teori asfalt

kaplamalı üstyapı tabakaları için daha üstün bir analitik yapı oluşturabilecek gibi görünmektedir.

Monismith ve Secor, Poisson oranlarını, sınırlandırılmamış sabit gerilme oranlı testler esnasında gözlemlenen hacimsel değişmelerden ölçmüşlerdir.

<u>Isı</u>	<u>Poisson Oranı</u>
40 ⁰ F	0.35
77 ⁰ F	0.50
140 ⁰ F	0.50

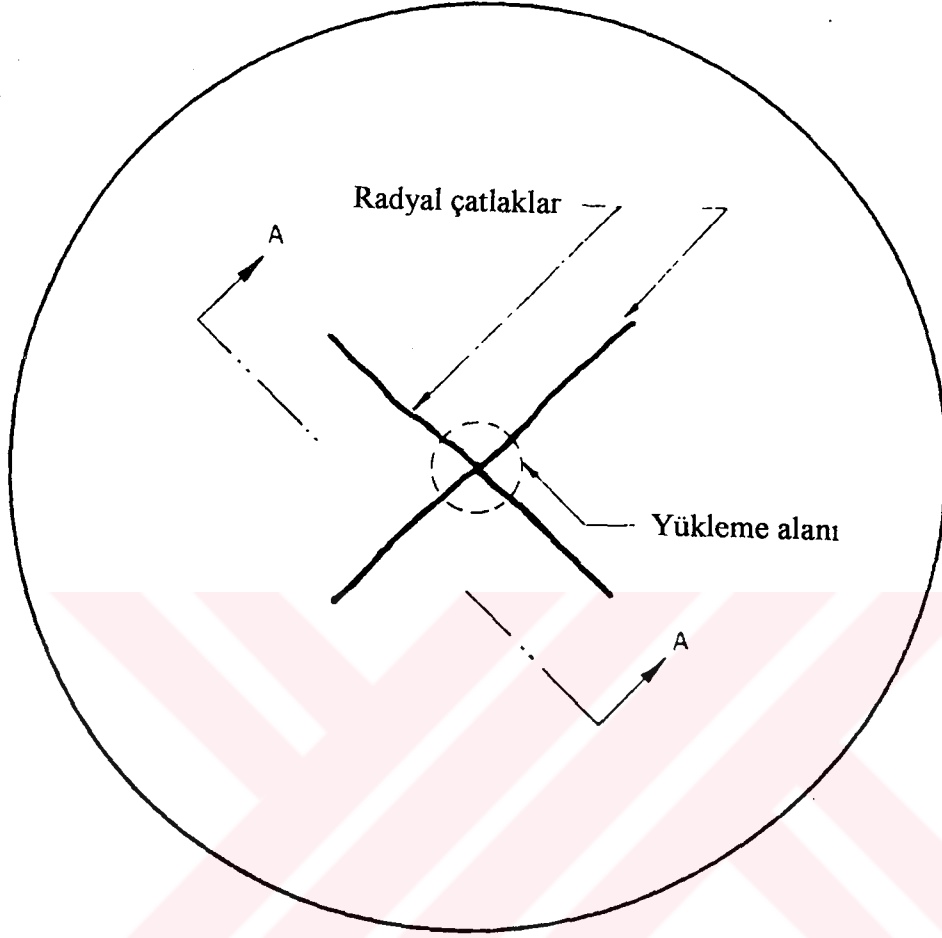
Materials Research and Development Inc. üstyapı içerisindeki malzemelerin karakteristikleri üzerine çalışmış ve malzemelerin yüklemeye ve çevresel koşullara karşı davranışlarını bünyesel denklemlerle ve modellerle ifade etmeye çalışmışlardır.

Bu çalışmada, numuneye belirli bir periyot içerisinde trafik altında bulundurulduktan sonra, kısa süreli basit tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Arazi koşulları simülasyonunu sağlamak için, tekrarlı üç eksenli (triaxial) yükleme testleri aksel ve radyal gerilmeleri ölçen bir aparatla birlikte yapılmıştır. Bu testler malzemelerin olduğu kurgusu ile yürütülmüş ve esnek (resilient) deformasyonlar ölçülmüştür. Bununla birlikte basit yükleme altında zamana bağlı toplam deformasyonları da içeren, toplam tepki kayıtları elde edilmiştir.

Asfalt betonu ile ilgili elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

1. Asfalt betonunun deneysel verilerinin incelemesi sonucunda, çeşitli yükleme ve çevresel koşullar altındaki üstyapının tüm tavırlarını modelleyebilecek ve eşitlik oluşturabilecek bir olgu sözkonusu değildir.

2. Üstyapı malzemeleri, genellikle, üstyapı sisteminde üç eksenli gerilme altındadır. Bunun yanında test prosedürü içerisinde karakteristikleri iyi belirleyebilmek için rasgele gerilme durumu da bulunmalıdır. Bu koşulları sağlayabilmesi açısından üç eksenli gerilme uygulayabilecek aparatlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında kesme gerilmesi ile birlikte normal gerilmeyi bir arada uygulayabilmek için teknik geliştirmek gerekmektedir.
3. Asfalt beton davranışında ısı en belirgin faktör olarak görülmüştür. Bunun neticesinde asfalt çimentosunun karakteristiklerinin o kadarda belirgin bir özellik olmadığı görülmüştür. 0.1 saniyedeki kısa yükleme durumunda E modülü, 40⁰F'da $2.5 \cdot 10^6$ 'dan, 140⁰F'da $8.5 \cdot 10^3$ psi'ye düşmüştür. Diğer taraftan poisson oranı 40⁰F-0.27'den, 140⁰F'da 0.49'a yükselmiştir.
4. Non-lineer elastik model yukarıda bahsedilen yükleme koşullarında, 55⁰F'ın altındaki sıcaklıklarda asfalt betonunun davranışını temsil edebilir. Bu sıcaklıkların üstünde zaman faktörü ihmal edilmeyecek kadar belirgin olmakta ve visko-elastik model bu durumda düşünülmelidir.
5. Radyal gerilmenin (0'dan 70'e kadar) E modülü üzerindeki etkisi çok belirgin değildir. Poisson oranı ise gerilme durumuna göre çeşitli değerler almaktadır. Genellikle değeri artan eksenel basınç gerilmesiyle biraz artmakta ve artan eksenel çekme gerilmesiyle azalmaktadır. Radyal gerilmelerde Poisson oranı üzerinde belirgin bir özelliği görülmemiştir.
6. Verilerden anlaşılacağı gibi asfalt betonu başlangıçta izotrop olabilecekken, gerilmenin ve ısının fonksiyonu ile anizotrop hale gelebilmektedir.

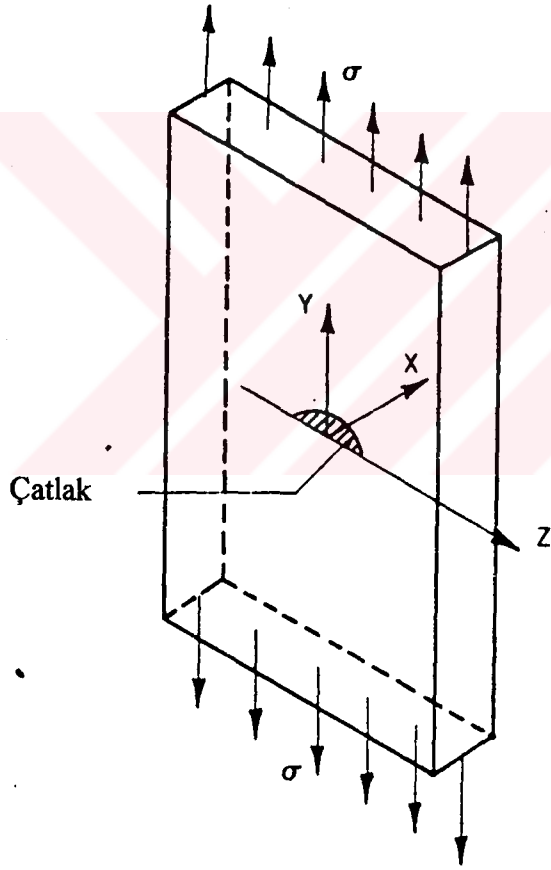
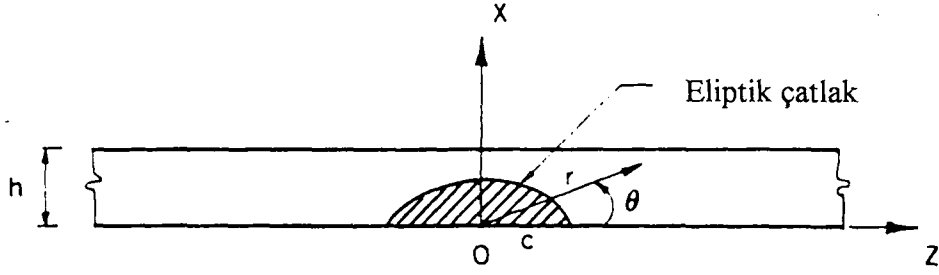


Plan

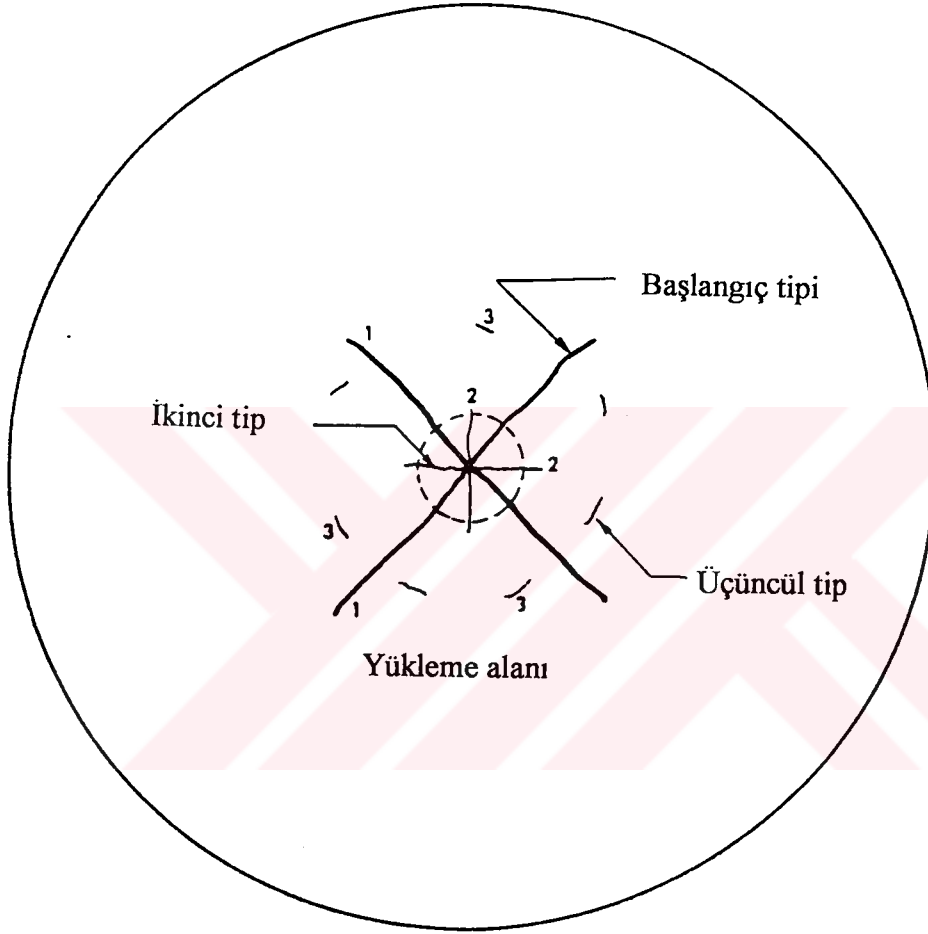


A-A kesiti

Şekil 2.10 Muhtemel çatlak yayılma tipi (Majidzadeh ve Ramsamooj)



Şekil 2.11 Normal gerilme altında eliptik çatlak (Majidzadeh ve Ramsamooj)



Şekil 2.12 Çatlak yayılma tipi (Majidzadeh ve Ramsamooj)

3. YORULMA DENEY METODLARI

Bu bölümde, asfalt betonunun yorulma davranışının ölçümü için seçilen metodlar tartışılmaktadır. Ayrıca bunların yarar ve sakıncaları ile birlikte bir özet verilmektedir. Genel sınıflama;

1. Basit Eğilme (Simple Flexure): Yorulma ömrü, gerilme/deformasyon ilişkisi basit eğilme, üç nokta veya orta nokta yükleme konfigürasyonundaki kirişlerin sinüzoidal veya tek vuruşlu yüklere maruz bırakılması şeklinde geliştirilmiştir. Dönen konsol kirişler ve trapezoidal konsol kirişler sadece sinüzoidal yüke maruz bırakılırlar.
2. Mesnetli Eğilme (Supported Flexure): Yorulma ömrü ve gerilme/deformasyon ile doğrudan ilişkili olan bu deney metodunda kirişler veya plaklar arazideki yükleme modu ve gerilme durumunu temsil edecek şekilde mesnetlenirler.
3. Doğrudan Eksenel (Direct Axial): Bu deney, yüklerin vuruşlu veya sinüzoidal olarak eksenel olamayacak şekilde tersinir gerilmeli veya gerilmesiz olarak uygulanmaktadır.
4. Dairesel (Diametral): Bu deney silindirik numunelere eksenini doğrultusunda vuruş uygulanması şeklinde yapılmaktadır.
5. Üç Eksenli (Triaxial): Bu deney sınırlamalarla, doğrudan eksenel deneylere benzer şekilde uygulanmaktadır.
6. Kırılma (Bozulma) Deneyi (Fracture): Yorulma ömrünü tahmin etmek için bozulma mekanizması prensiplerinin kullanıldığı deneylerdir.
7. Trafik Altında Sıkıştırma Deneyi (Wheel-Tracking): Tam ölçekli ve laboratuvar olmak üzere iki şekilde düzenlenmiş olan bu deney, çatlama miktarı, yük tekrar sayısı ve ölçümler ve/veya gerilmelerin kaydedilmesi ile doğrudan ilişkili deneylerdir. Tam ölçekli deneyler için doğrusal ve dairesel yolların her ikisi de kullanılmaktadır.

3.1 Basit Eğilme (Simple Flexure)

Çoğunlukla yorulma deneyi bilgileri, numunelerin uygun olamayan karışım karakteristikleri sergileyinceye veya bozuluncaya kadar gerilme ve deformasyon tekrarlarına maruz bırakıldığı basit eğilme deneyleri tarafından ortaya çıkmıştır.

Bu deneylerin sonuçları aşağıda tanımlanan denklemler ile tanımlanmıştır (Pell, 1967; Monsmith et al., 1966; and Pell et al., 1975).

$$Nf = a * \left(\frac{1}{\epsilon t} \right)^b \quad 3.1$$

$$Nf = c * \left(\frac{1}{\sigma t} \right)^d \quad 3.2$$

ϵt = Tekrarlı deformasyonun büyüklüğü

σt = Tekrarlı gerilmenin büyüklüğü

a, b, c, d = Malzeme katsayıları (laboratuvar deneylerinden elde edilen)

Nf = Numuneyi bozan yükün tekrar sayısı

Asfalt betonu karışımların yorulma karakteristiklerinin araştırmak için farklı tipte Basit eğilme deney ekipmanları geliştirilmiştir. Bunlar;

1. Yükün sinüzoidal veya vuruşlu olarak uygulandığı orta nokta veya üç nokta yükleme deneyleri.
2. Sinüzoidal yüke maruz bırakılan Dönen Konsol kirişler ve
3. Sinüzoidal yük veya deformasyona maruz bırakılan Trapez Konsol kirişlerdir.

3.1.1 Orta nokta ve üç nokta yüklemesi

Her iki, üç nokta veya orta nokta yüklemesinde de basit mesnetlenmiş numuneler kontrollü yük veya şekil değiştirmeye maruz bırakılırlar.

Örnek ekipmanlar olarak, Berkeley'de University of California ve Asphalt Institute tarafından kullanılan ekipmanlar verilebilir (Şekil 3.1). University of California ekipmanı için 1.5x1.5x15 in. ve Asphalt Institute ekipmanı için ise daha büyük boyutta 3x3x15 in. boyutlarında numuneler kullanılmaktadır.

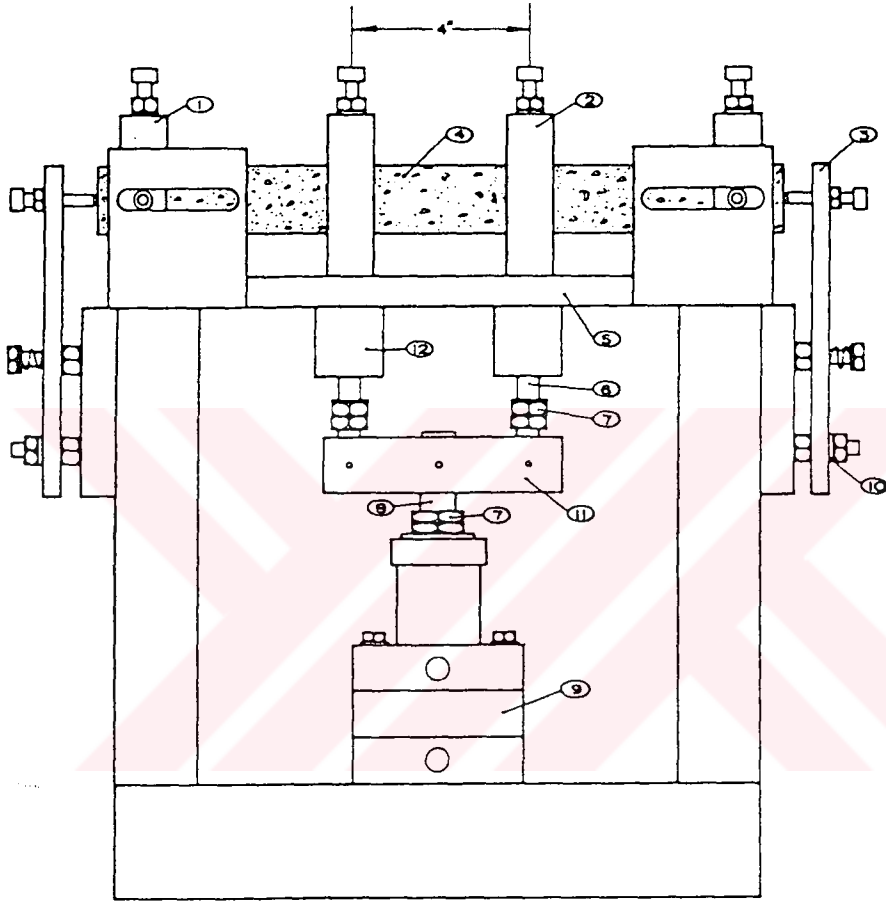
Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, kirişin ortasında üniform bir eğilme momenti sağlamak için yük iki yerden uygulanmaktadır. Bu ekipman ile dakikada 100 tekrar yapan 0.1 sn'lik yükleme zamanına sahip yük vuruşları uygulanmaktadır. Tipik yer ve şekil değiştirmenin ayrıntıları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kontrollü yük (gerilme) ve şekil değiştirme (deformasyon) yük modlarının her ikisi de yapılabilmektedir.

Amsterdam'da bulunan, Shell laboratuvarı (The Shell Laboratory) şekil 3.2'de gösterilen orta nokta yükleme ekipmanı kullanılmaktadır. Numune boyutları 30 mm (1.2 in.)x40mm(1.6 in.)x230 mm(9.2 in.)'dir ve numuneler kontrollü-şekil değiştirme (deformasyon) modunda test edilmektedirler.

3.1.2 Konsol yükleme

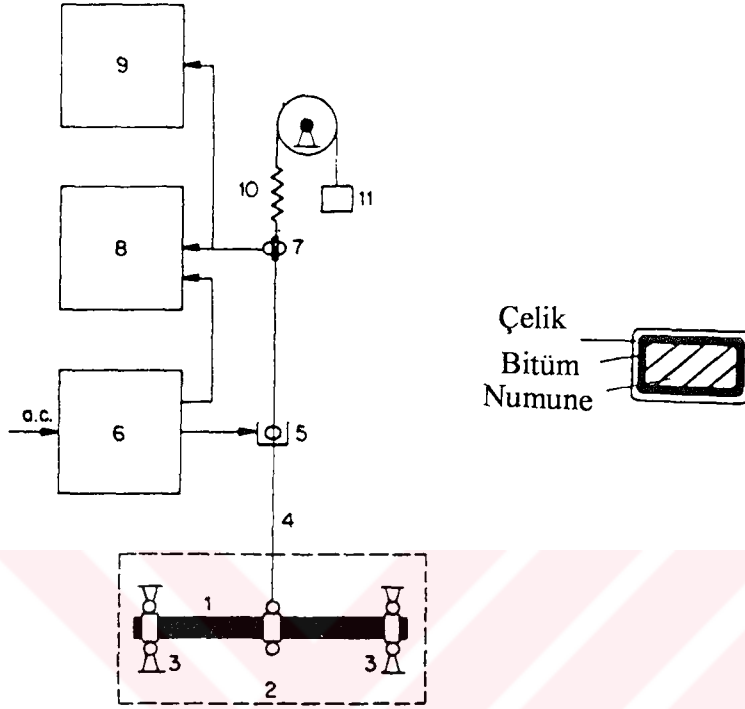
Dönerek Yükleme: University of Nottingham'da (Pell et al., 1975 ve 1973), dönen konsol bir kol üzerine dik olarak monte edilen numuneye yük uygulayan ve numunenin içerisinde sabit genlikte bir gerilme oluşturan Dönen Konsol Makine kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Deneylein çoğunluğu 1.000 rpm hızında ve 10 °C sıcaklıkta yapılmaktadır. Diğer bir makine ile sabit sinüzoidal genlikte deformasyon uygulanarak dinamik rijitlik ölçülmektedir. Hatta Pell bitümlü malzemelerin bazı yorulma deneyleri için Şekil 3.4'de gösterilen kontrollü-deformasyon burulma yorulma makinesi kullanılmıştır.

Trapezoidal Kirişlerin Sinüzoidal Olarak Yüklmesi: Trapezoidal numuneler üzerinde deneyler Shell araştırmacıları (Van Dijk, 1975) Belçikalı araştırmacılar ve LCPC (Bannot, 1986) tarafından yürütülmüştür. Şekil 3.5'de LCPC ekipmanı gösterilmiştir.



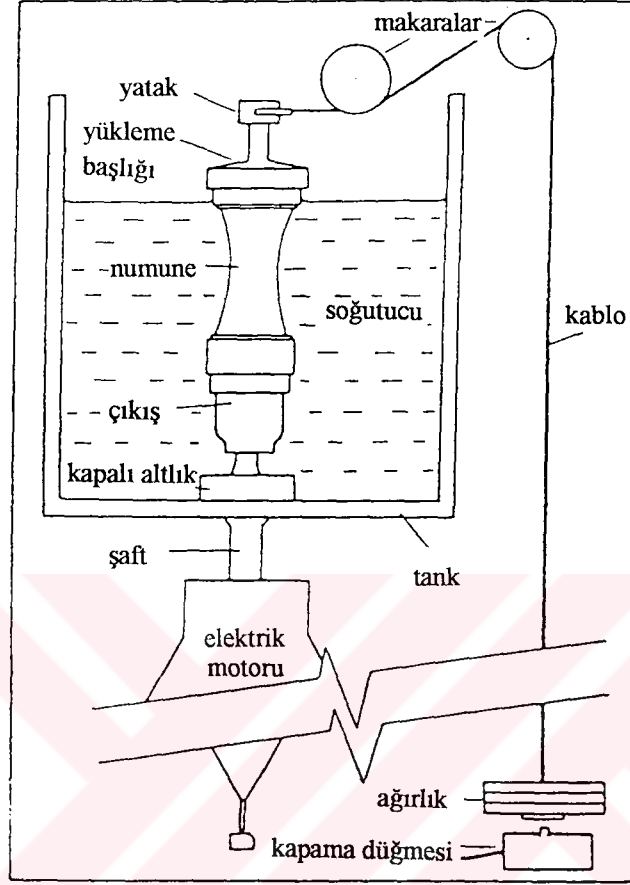
- | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 1. Tepki köşebenti | 5. Dip plaka | 9. Belloform silindiri |
| 2. Yük köşebenti | 6. Yükleme çubuğu | 10. Kauçuk yıkayıcı |
| 3. Sınırlayıcı | 7. Durdurma somunu | 11. Yükleme kolu |
| 4. Numune | 8. Piston kolu | 12. Thomson halka fırçası |

Şekil 3.1 Üç noktalı eğilme aparatı (Monismith, et al,1971)

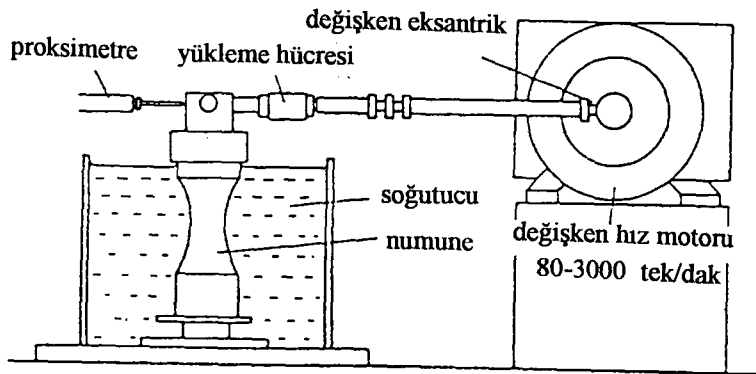


1. Çelik köşebent içindeki numune
2. Termostat
3. Sabit köşebentler
4. Vibratör mili
5. Elektrodinamik vibratör
6. Akım ölçer
7. Elektrodinamik transduser
8. Faz açısı ölçer
9. Voltmetre
10. Yumuşak yay taşıyıcısı
11. Dengeleyici ağırlık

Şekil 3.2 Orta nokta eğilme aparatı (van Dijk, 1972)

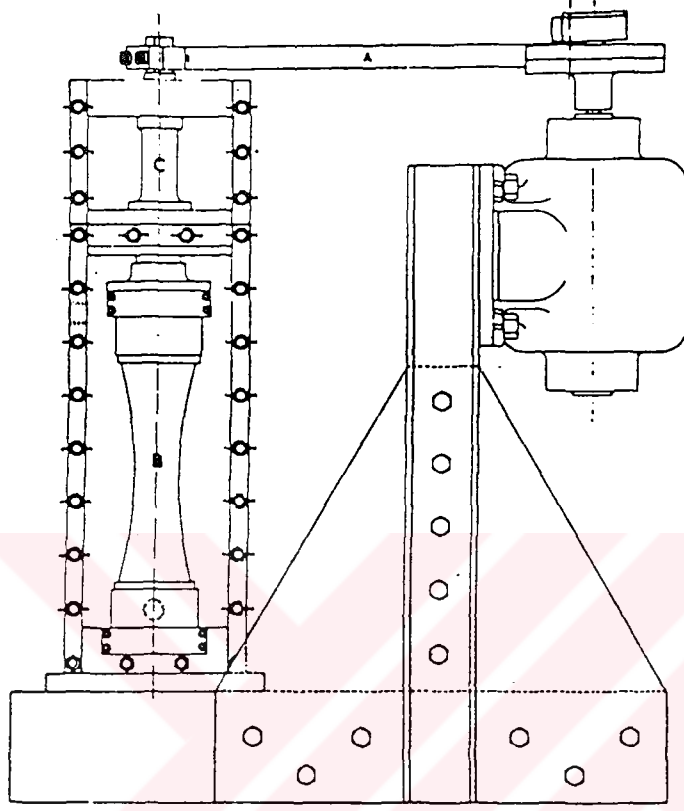


(a) Gerilme kontrollü Dönen eğilme

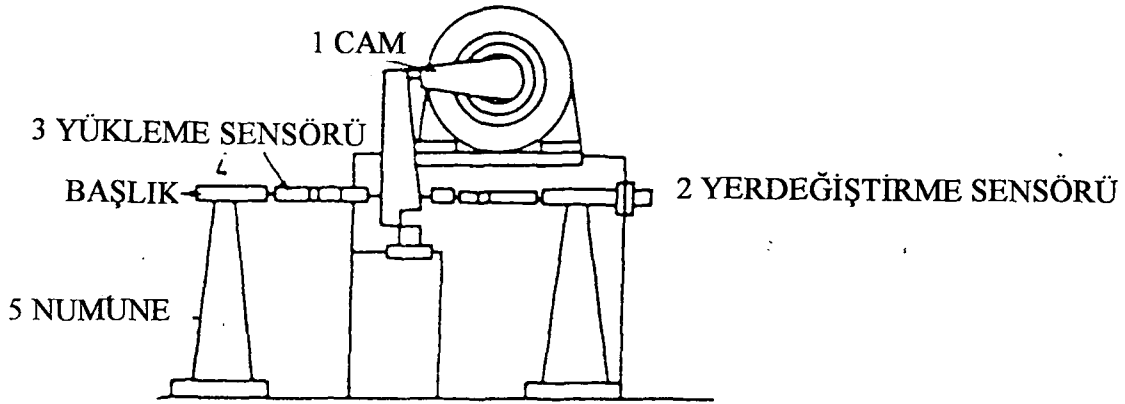


(b) rijitlik makinesi

Şekil 3.3 Pell'in kullandığı eğilme aparatı (1965)



Şekil 3.4 Deformasyon bükülme yorulma makinesi (Pell,1965)



Şekil 3.5 Bükme yorulma deney makinesi (Bonnot, 1986)

Trapez numunenin daha büyük kenarı sabitlenmiş ve daha küçük kenarına sinüzoidal olarak deformasyon (Bannot, 1986; Van Dijk, 1975 ve Verstraeten, 1972) ve gerilmeden (Kunst, 1989) herhangi biri uygulanmıştır.

Doğru trapez boyutlarının seçilmesi ile numuneler büyük kesitlerden ziyade en büyük eğilme gerilmesinin olduğu numunenin yaklaşık olarak orta noktasından bozulacaktır. Van Dijk tarafından test edilen numuneler, taban kesitinde 55x20 ve üst kesitinde 20x20 ve 250 mm uzunluktadırlar.

3.1.3 Değerlendirme

Yararları: Basit eğilme deneylerinin yararları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Bu deney metodu kullanımı yaygın, iyi bilinen ve kolaylıkla anlaşılabilir.
2. Ölçümlerden elde edilen temel özellikler dizayn ve değerlendirme aşamalarında kullanılabilir.
3. Deney sonuçları doğrudan (uygun bir değiştirme faktörü ile) üstyapıların dizaynında çatlak ve eğilme tahmininde kullanılabilir.
4. Kontrollü-deformasyon deney sonuçları ince asfalt kaplamalı üstyapıların dizaynında kullanılırken, kontrollü-gerilme deney sonuçları kalın asfalt tabakalı üstyapıların dizaynı için kullanılabilir.
5. Üç nokta yüklemesinde, numunelerin bozulması Üniform bir gerilme bölgesinde başlamaktadır. Bu özellik deney sonuçlarındaki katsayıların azaltılmasında yardımcı olmakta ve daha az numuneye gereksinim duyulmaktadır.

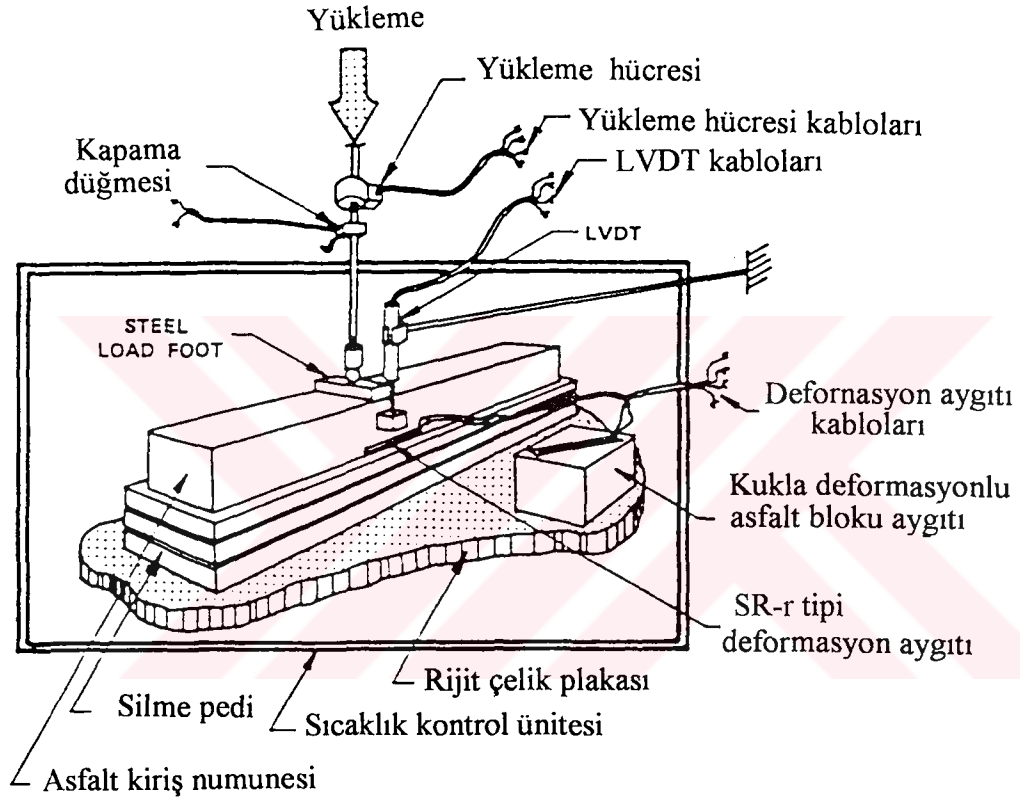
Sınırlamalar: Bu metodolojideki ana sınırlamalar;

1. Arazi ve laboratuardaki üstyapı performanslarının karşılaştırılmasının değerlendirilmesi üstte anlatılan bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duymasından dolayı zordur.
2. Metod pahalı, zaman harcayıcı ve özel ekipmana ihtiyaç göstermektedir.
3. Orta nokta yüklemesinde nisbi üniform çekme gerilmesi bölgesindeki bozulma başlangıcını bulmak mümkün değildir.
4. Üstyapı içerisinde farklı olarak gerilme durumu aksenal değildir.
5. Çekme deformasyonu ve gerilmesi hesabı için Elastik Teori esasları kabul edilmektedir.

3.2 Mesnetli Eğilme

Arazideki yükleme modunu daha iyi temsil etmektedir. Birkaç araştırmacı bir hava yastığı (Jimenez et al., 1962) veya bir lastik yataktan herhangi biri ile mesnetlenmiş olan dairesel plaka numuneleri kullanmışlardır. Plakaların ortasına arazide oluşan gerilme durumu ile benzer şekilde gerilme oluşturacak dairesel şekilli tekrarlı yük uygulanmaktadır.

Ayrıca Barksdale (1977) tarafından asfalt betonu temellerin yorulma karakteristiklerini tespit etmek için kiriş yorulma deneyleri kullanmıştır. Bu metodolojide, arazideki mesnetlenme şartlarına benzetmek için lastik yataklar üzerine kirişler yerleştirilmiştir (şekil 3.6). Yorulma deney ekipmanı bir yük hücresi, bir 4 in. Kalınlıklı (102 mm) lastik yatak (284 pci veya 7.861gm/cc taban zemini reaksiyon modüllü) destekli kiriş ve bir hava basınçlı yükleme sisteminden ibarettir. Numuneler ve lastik destek 80 °F



Şekil 3.6 Yorulma deney aparatı (Barksdale, 1977)

(27 °C)'de sabit bırakılmış olan sıcaklık kontrollü bir hücre içerisine yerleştirilmiştir. Yük vuruşu yaklaşık yarı sinüzoidal şekilli 0.06 saniye yüklemelidir. Frekans olarak ise 45 cpm kullanılmaktadır.

Yararları: Bu metodolojinin yararları;

1. Arazi şartları daha iyi temsil edilmektedir.
2. Kontrollü-gerilme ve kontrollü-deformasyon yükleme modlarının ekstremeleri arasında deney uygun değerler vermektedir.
3. Yüksek sıcaklıklardaki numune boyundan dolayı oluşan eğilme problemini ortadan kaldırmaktadır.
4. Numunenin mesnetlenmesi numunede bulunan kılcal kusurları azaltacağı ve böylece deney sonuçlarının dağılmasının azalacağı umulmaktadır.

Sakıncaları: Bu metodolojinin sakıncaları;

1. Kiriş numuneler için tek eksenli gerilme durumu söz konusudur ve gerilmenin durumu numunelerin ne şekilde sıkıştırıldığına bağlıdır. Ayrıca, numuneler tersinir gerilmeye maruz kalmayabilirler.
2. Deneyin yapılması için diğer çoğu yorulma deneyinden daha fazla süre harcanması gereklidir.
3. Basit eğilme ekipmanı ile karşılaştırıldığında daha pahalı ve karmaşıktır.

3.3 Eksenel (Direct Axial)

3.3.1 Çekme

TRRL (The Transport and Road Research Laboratory) İngiltere'de 0-1 saniye arasında değişen dinlenme periyodlu, 40 ms lik yükleme zamanlı ve 25 Hz frekansta yük

uygulayarak tersinir gerilme olmaksızın tek eksenli çekme deneyleri yapmıştır. Rathby'a göre çok kısa dinlenme periyotlarından başlanılarak dinlenme periyodunun kritik 0.4 saniyeye ulaşana kadar arttırılması ile yorulma ömrü artmaktadır. Bunun haricinde dinlenme periyodundaki süreklilik yorulmayı çok az etkilemektedir. Bu deneyler kontrollü-gerilme modunda gerçekleştirilmiştir.

Son zamanlarda Hollanda'da (Kunst, 1989) 1 ve 0.1 Hz'lik frekanslarda tek eksenli çekme deneyleri yapılmıştır. Ancak şu anda Hollandalıların deneyleri henüz değerlendirilmemiştir.

Yararları:

1. Numuneler dikdörtgen kesitli olduğu kadar dairesel de olabilmektedir.
2. Prensipte arazi şartlarını da değerlendiren bir dönüştürme katsayısı oluşturulursa, eksenel çekme deney sonuçları üstyapının yorulma yeteneği, dizayn ve karışımın değerlendirilmesi için kullanılabilir.
3. Eğilme deneyleri ile karşılaştırıldığı zaman daha basit ve daha az maliyetlidir. Deney süresi yük tekrar süresinin daha kısa olmasından dolayı daha kısadır.
4. Çekme gerilme ve deformasyonu daha rahatlıkla belirlenmekte ve deformasyon olması durumunda doğrudan ölçülmektedir.

Sakıncaları:

1. Yükleme durumu arazi şartlarının yansıtılmamaktadır.

3.3.2 Çekme/Basınç

Yorulma deneyinin bu şekli TRRL (Raithby, 1972) tarafından geliştirilmiştir. Bir servo kontrollü elektro hidrolik makine kullanılarak eksenel çekme ve basınç yükü uygulanmaktadır. Numuneler, 75 mm² kesit alanlı 255 mm uzunluklu prizmalardır

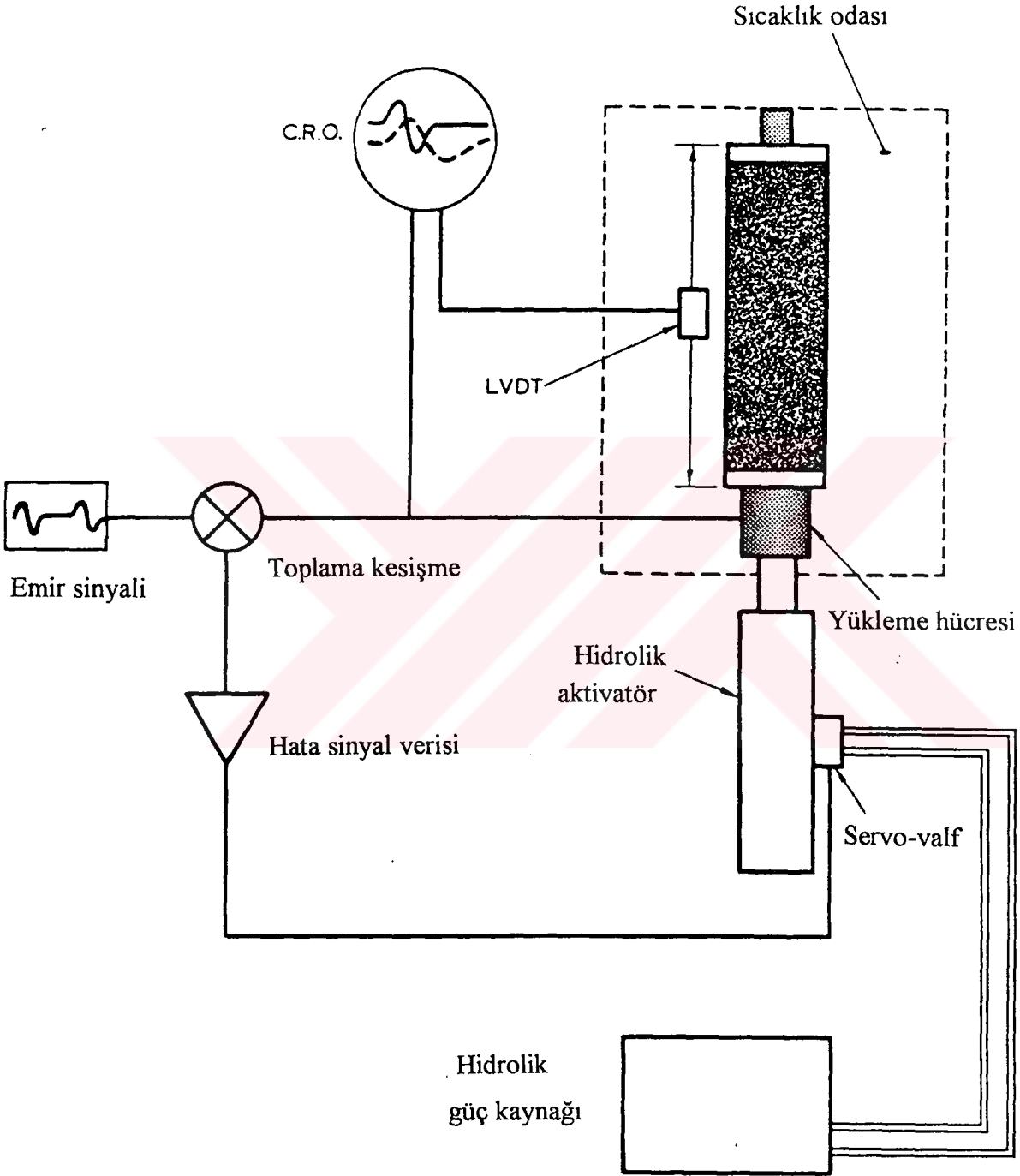
(Şekil 3.7). Yük frekansları 16.7 ve 25 Hz dir ve dinlenme periyodunun etkisi, deformasyonun etkisi, deformasyonun şekli ve yük uygulaması sırasının (basınç/çekme, çekme/basınç, sadece basınç, sadece çekme) etkisi dahi değerlendirilmektedir. Raithby'ın bu deney ekipmanı ile yapmış olduğu çalışmalardan elde etmiş olduğu sonuçlar aşağıda sıralanmıştır. Bunlar;

1. Pratikte olduğu gibi birbirini izleyen aks yükleri arasında oluşan ve yorulma ömrü üzerinde önemli etkiye sahip dinlenme periyotlarına benzer periyotlar uygulanmaktadır.
2. 1 saniye dinlenme periyotlu yüklemelerde oluşan yorulma ömrü ile 25 Hz'lik sürekli yüklemelerdeki karşılaştırıldığında yorulma ömrünün 25 katına varana kadar arttığı görülmektedir ve sıcaklığa bağlı olarak ta ömür artmaktadır. 25 °C üzerinde kısa dinlenme periyotlarının yorulma ömrü üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir.
3. Yükleme şeklinin (örneğin sinüzoidal, trapezoidal ve üçgensel) etkisi çok büyük değildir. Bu nedenle de laboratuvar deneyleri için sinüzoidal yükleme önerilmektedir.
4. En büyük yorulma ömrü sadece basınç tekrarlı yükleme, daha sonra ise sırasıyla çekme/gerilme, sadece çekme ve basınç/çekme tekrarlı yüklemeler izlemektedir. Çekme/basınç ve basınç/çekme yüklemelerinin yorulma ömrü üzerindeki etkileri arasındaki farklılık yaklaşık olarak % 30'dur.

Yararlar: Yararları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Arazideki yük uygulanmasına benzer yük uygulamak mümkündür. (basınç/çekme/basınç)
2. Sonuçlar karışımın etkisini değerlendirmekte kullanılabilir ve bir arazi dönüşüm katsayısı ile üstyapının yorulma çatlaklarına göre dizaynında kullanılabilir.

Sakıncaları: Sakıncaları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.



Şekil 3.7 Doğrudan aksenal yorulma deneyinin şematik temsili (Raithby ve Sterling, 1972)

1. Yükün uygulanma şekli hariç deney arazi şartlarını iyi bir derecede temsil etmemektedir.
2. Doğrudan çekme deneyleri ile karşılaştırıldığında çok zamana ihtiyaç gösterir, daha pahalıdır ve özel ekipmana ihtiyaç gösterir.

3.4 Dairesel Deney

Dairesel yorulma deneyi bir silindirik numuneye ekseni boyunca yük uygulanması şeklinde yapılır. Bu yük konfigürasyonunda uygulanan yük doğrultusuna ve dik çap boyuna dik doğrultuda oldukça üniform bir çekme gerilmesi ortaya çıkar.

Bu deneyi uygulamak için uygulama açısından oldukça basit ve temel karakteristiklerin tespit edilmesi için efektif bir metoddur. Bir çok araştırmacı malzemeleri değerlendirmek ve üstyapıyı analiz etmek için bu deneyden yararlanmışlardır. (Kennedy et. All.,1983 and 1968; Scholz, Hicks et. All.,1989; Khasla and Omer, 1985; Schmidt, 1971; etc.)

Ekipman ve Prosedür: Yükleme konfigürasyonu, Şekil 3.10 da gösterilen oldukça basit ve yüklemelerin elektro-hidrolik veya havalı sistemler gibi farklı sistemler ile uygulanabilir. Genellikle yarı sinüzoidal yükleme uygulanır. Kennedy ve Ömer (1985) dakikada 20 tekrarlık frekans ve 0.05 saniyelik yükleme zamanı kullanmıştır.

Deney numuneleri genellikle 4 in. çapında ve 2.5 in. yükseklikindedir. Yük 0.5 in. genişlikli bir silindir ile dairesel silindirik numuneye iletilir.

Gerilmelerin hesaplanması : Kennedy ve Huson'a göre, uygun büyüklükteki yük altında bulunan numune yük hattı boyunca basınçtan dolayı bozulmaktadır. Basınç gerilmeleri yayılı yükün dağılması ile oldukça azalmakta ancak önemli bir büyüklükteki yük dik çap boyunca çekme bozulmasına sebep olmaktadır.

Yayılı yük altında (Şekil 3.8 ve 3.9) numunenin merkezindeki gerilmeler;

$$\sigma_t = \left[\frac{2P}{\pi a h} \right] * \left[\sin(2a) - \frac{a}{2R} \right] \quad 3.3$$

$$\sigma_c = \left[\frac{-6.P}{\pi a h} \right] * \left[\sin(2a) - \frac{a}{2R} \right] \quad 3.4$$

Bağıntılarından hesaplanır.

P=Uygulanan yük

a=yük çubuğunun genişliği

h=numunenin yüksekliği

R=numunenin yarıçapı

2α =yük çubuğunun genişliği ile orijinin birleştiği nokta arasındaki açı

σ_t =Dolaylı çekme gerilmesi (yatay)

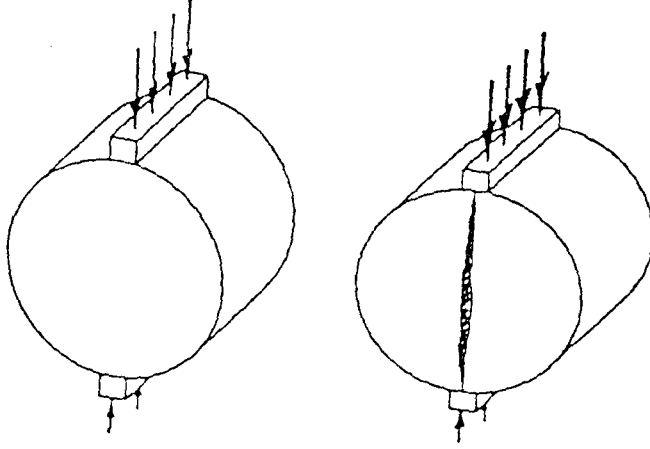
σ_c =Dolaylı çekme gerilmesi (dikey)

Numunenin merkezinde dik yöndeki basınç gerilmesi yatay çekme gerilmesinin üç katıdır.

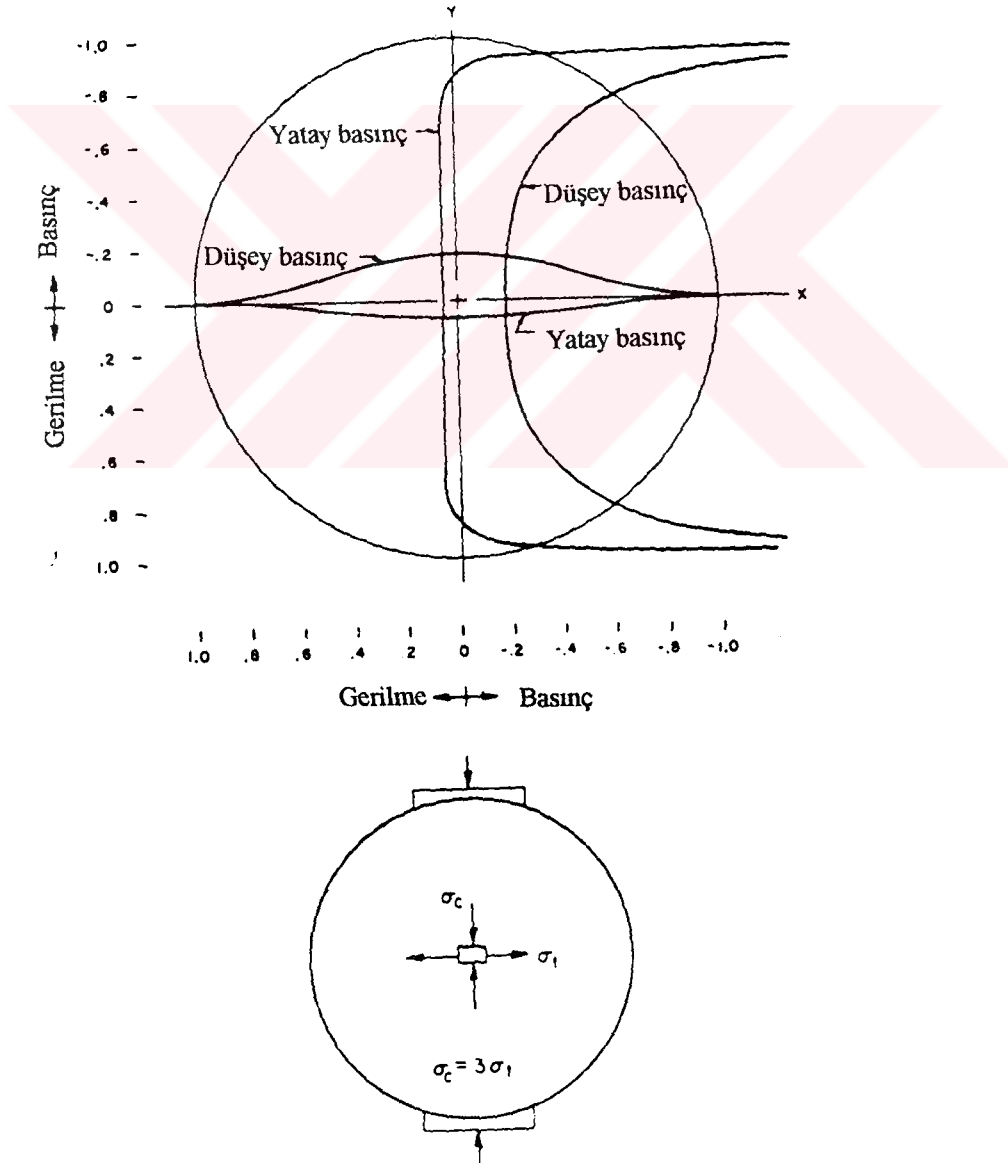
İlave olarak eğilmeli giriş ve dairesel yorulma deneyleri arasında iki tane farklılık mevcuttur. Bunlar;

1. Eğilmeli yorulma deneylerinde kalıcı deformasyon sınırlandırılmıştır, ancak dairesel yorulma deneylerinde izin verilmiştir.
2. Gerilme geri dönüşleri dairesel deneyler için pratik değildir.

Bu farklılıklardan dolayı dairesel yorulma deneylerinde elde edilen yorulma ömrü eğilmeli deneylere nazaran daha kısadır.



Şekil 3.8 Dairesel yüklemenin konfigrasyonu ve kırılması (Kennedy, 1977)



Şekil 3.9 İzafi basınç dağılımı ve dairesel gerilme deneyi için iki eksenli gerilme durumu (Kennedy, 1977)

Yararlar: Dairesel yorulma deneyi bir kaç tane yarar sunmaktadır:

1. Bu deney basit ve doğaldır.
2. Arazi korelasyonu ile birlikte üstyapı ve karışımların dizaynında kullanımı mümkündür.
3. Ekipmanlar diğer deneyler içinde uygundur (Örneğin: resilient modul ve çekme mukavemeti gibi).
4. Bozulma başlangıcı üniform çekme gerilmesi bölgesindedir. Not edilmesi gerekli bir diğer husus ise Porter ve Kennedy tarafından tespit edilmiştir. Bu da : ($\sigma_t - \sigma_c$) etkili değişkenlerdir ve bu değişkenler için üniform gerilme bölgesi σ_t için tanımlanan üniform bölgeden çok daha küçüktür.
5. İki eksenli gerilme durumunun mevcut olması arazi şartlarının daha iyi simüle edilmesi ihtimalini artırmaktadır.
6. Deneyler laboratuvar numunelerine uygulandığı gibi arazi karotlarına uygulanabilir.

Sakıncaları:

1. Numunenin merkezinde iki eksenli gerilme durumu mevcuttur. Düşey ve yatay gerilme bileşenlerinin oranlarının farklı olması mümkün değildir, bundan dolayı da arazideki üstyapının kritik kesiminde oluşan gerilmeler iki defa oluşmaktadır.
2. Eğer yorulmanın tespitinde teorik çekme gerilmesi kullanıldı ise bu metod yorulma ömrünü tam olarak tespit edememektedir. Şayet $\sigma_t - \sigma_c$ gerilme farklılığı yorulma tahmininde kullanılırsa yine yorulma ömrü diğer deneylere nazaran uygun tespit edilememektedir.
3. Gerilme geri dönüşlerinin bulunmamasının ve kalıcı deformasyonların kümülatif olarak toplanmasının da sakıncaları vardır.

3.5 Üç Eksenli

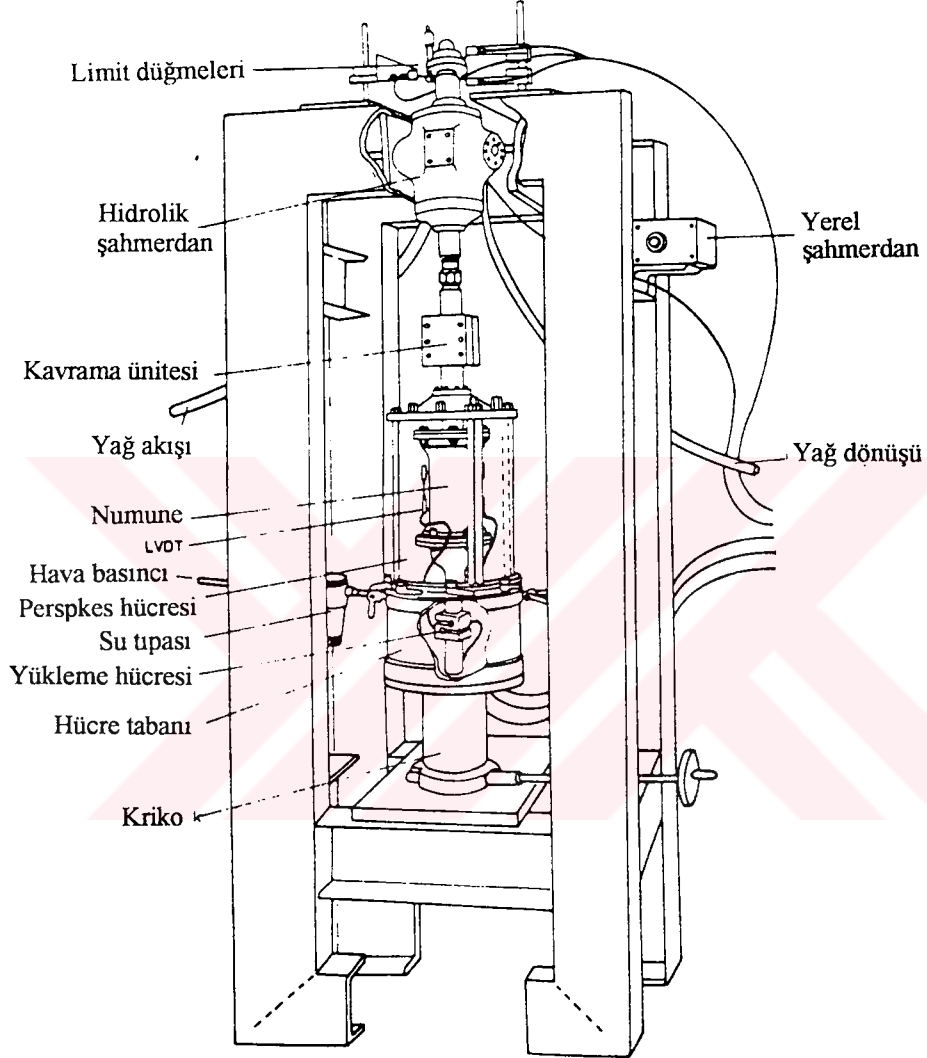
Bu tip yorulma deney ekipmanına örnek olacak olan bir tanesi Nottingham'da geliştirilmiştir. Bu ekipmana ait şekil 3.10'da verilmiştir (Pell and Brown, 1972 ve Pell ve Cooper,1975). Numuneler 4 in. çapında ve 8 in. yüksekliğindedir. Numuneler sinüzoidal olarak değişen eksenel gerilmeye maruz bırakılırlar. Bu ekipman gerilme sınırlandırmalı ve sınırlandırmazlık çekme-basınç deneyleri içinde kullanılmıştır.

Radyal ve eksenel gerilmelerin bağımsız olarak uygulandığı diğer bir üç eksenli tekrarlı yorulma deneyi de kullanılmıştır. Mcv Lean (1974) de asfalt karışımlarının normal çekme ve basınç gerilmesi altında tekerlik izi oluşumu ile ilgili çalışmasında Şekil 3.11'de verilen bunun gibi bir deney ekipmanı kullanmıştır.

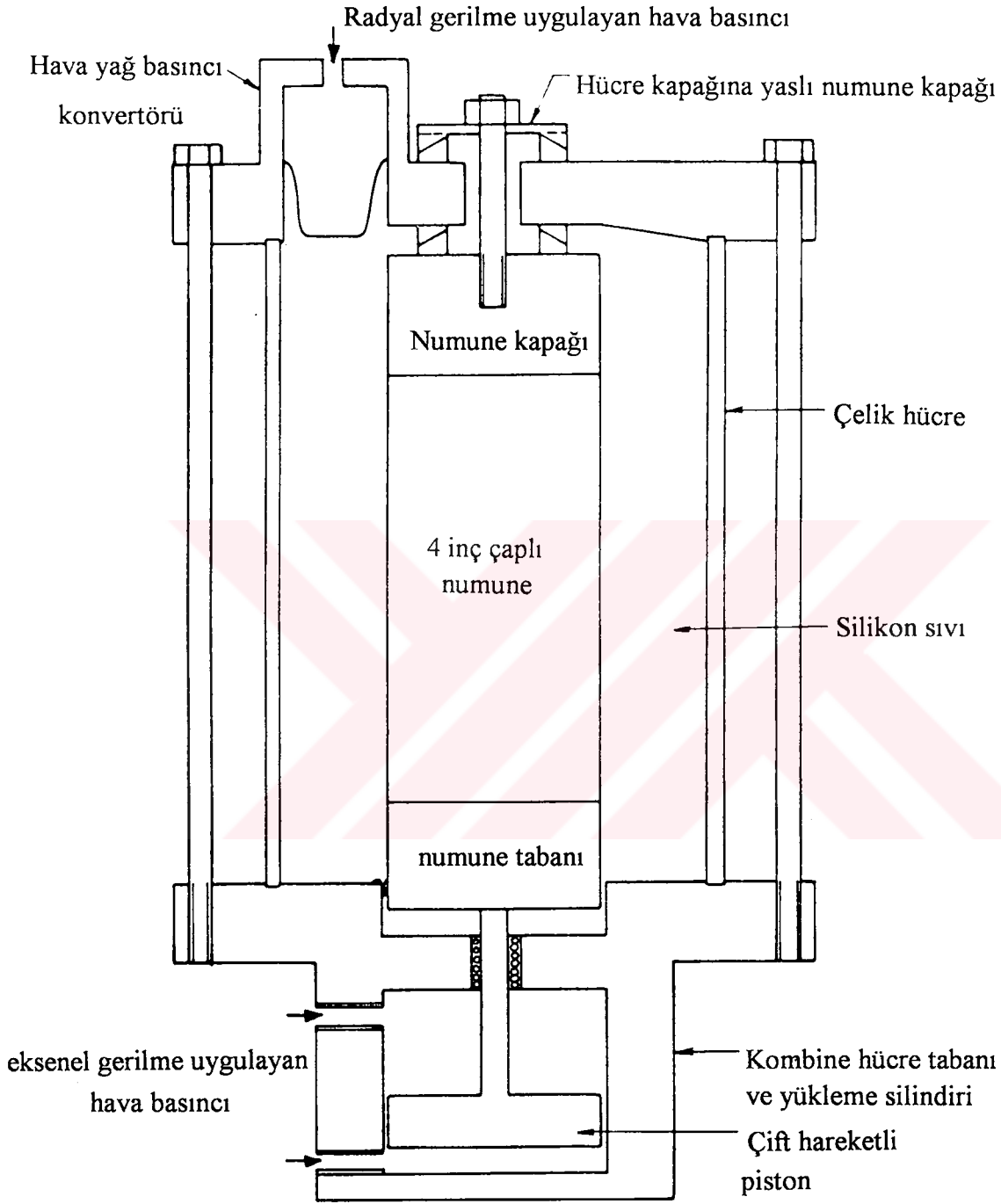
Bununla birlikte California'da içi boş silindir olarak üretilen numuneler üzerinde, dairesel gerilme ile birlikte dönmeli (tekrarlı ve sabit) kayma deformasyonu uygulayan deney ekipmanı geliştirilmiştir. Bu tarihte sadece kayma yorulması deneyleri uygulanmıştır. Daha sonraları içi boş silindir içerisine doğru vuruş üreten tekrarlı çekme gerilmeleri uygulayan bir ekipman olarak geliştirilebilirdi böylece de kayma gerilmesi ve çekme gerilmesi şartlarının simüle edebilirdi.

Yararlar: Üç eksenli gerilmenin faydaları aşağıda sıralanmıştır.

1. Basınçtan sonra çekmenin geldiği arazi yükleme şartlarının simüle edilmesi mümkündür.
2. Sonuçlar karışım dizaynında ve bir arazi dönüştürme faktörü ile yapısal dizayn için kullanılabilir.
3. Deney çoğu diğer laboratuvar deneylerinden daha iyi olarak arazide oluşan gerilme durumunu sunmaktadır.



Şekil 3.10 Üç eksenli yorulma yükleme aleti (Pell ve Cooper, 1975)



Şekil 3.11 Üç eksenli, eksenel ve radyal yük kontrollü deney aleti

Sakıncaları: Üç eksenli gerilmenin Sakıncaları aşağıda sıralanmıştır.

1. Kayma deformasyonu kontrol edilmelidir eğer bu yapılmaz ise arazi yorulma ömrü tahmin edilenden daha farklı olarak elde edilebileceği gözönüne alınmalıdır.
2. Bu deneyler pahalı, özel ekipman gerektirir ve çok zaman ihtiyaç gösterir.

3.6 Bozulma Mekanizması

Yorulma direniminin karakterize edilmesi için diğer bir yaklaşım bozulma mekanizması prensipleridir (Majidzadeh et al., 1971; Salam, 1971; ve Monisimith et al., 1973). Bu metotta yorulma üç aşamalı olarak göz önüne alınmıştır. Bunlar;

1. Çatlak başlangıcı,
2. Sabit çatlak büyümesi ve
3. Sabit olmayan çatlak büyümesidir.

İkinci aşamada yorulma ömrünün çoğunu tamamladığı farz edilir ve sonuç olarak, bu aşama için bozulma mekanizmasını temel alan modeller geliştirilmiştir.

Bu aşama için kullanılan temel ilişkilerden biri;

$$\frac{da}{dN} = A(K_1)^n \quad 3.5$$

a: çatlak uzunluğu,

K_1 : Mode I' deki gerilme yoğunluğu (gerilme*uzunluk*1/2)

N: Uygulanan yükün tekrar sayısı ve

A ve n: deneysel katsayılarıdır.

Bu metotta yorulma üç fazda değerlendirilmiştir.

Mode I: Çatlağın açılması,

Mode II: Çatlağın yarılması ve

Mode III: Çatlağın yırtılmasıdır.

Bu ilişkide sabit çatlama aşamasının başlangıç, a_0 , yorulma ömrünün sona erdiği kritik, a_c arasında olduğu farz edilmiştir ve K_c K_I 'in kritik değeri olarak belirlenmektedir.

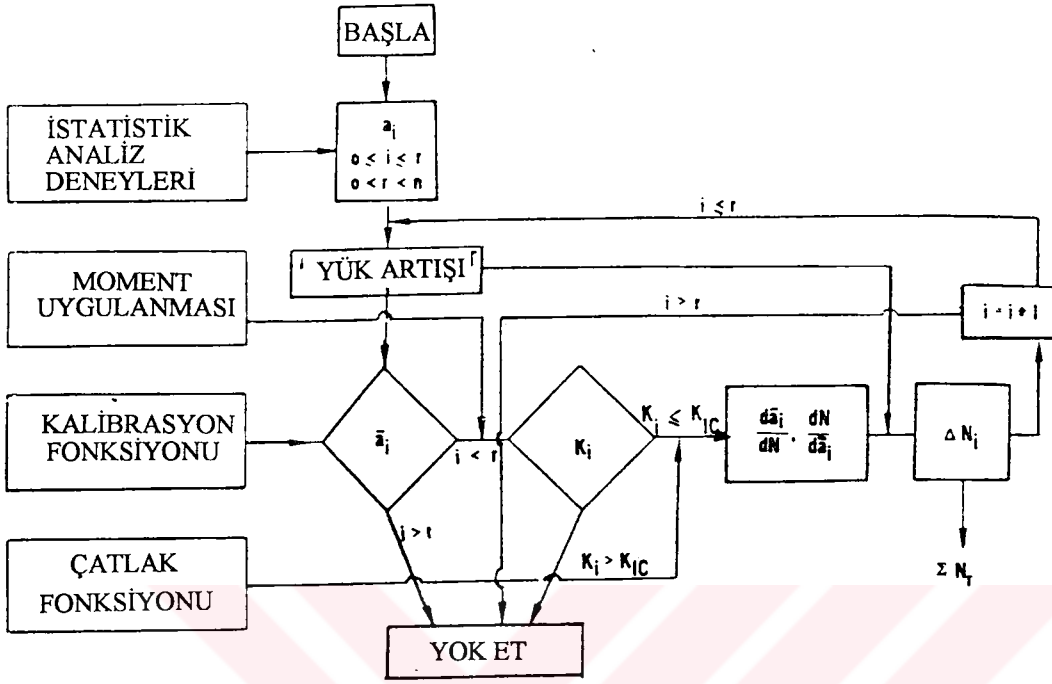
Ekipman: Bu metod da etkiyi belirlemek için farklı ekipmanlar kullanılmıştır. Şekil 3.1 ve 3.2 de gösterilen ekipmanlar kullanılmıştır.

Deney Metodolojisi: Metodolojide bozulma ve yorulma deneylerinin her ikisinde dahil edilmiştir. Örneğin (Monismith ve Salam, 1973) ve (Monismith, 1971) iki tip kullandılar;

1. Tek-kenar-çentik eğilme deneyleri ve (1.5 x 2.0 x 15 in.)
2. Tek-kenar-çentik çekme deneyleridir. (1.5 x 1.5 x 4.5 in.)

Kirişlerdeki çentiğin derinliği her iki bozulma deneyinde de 0-0.4 in arasındadır. Prensip, metodoloji şekil 3.12 'de verilen artırma tekniklerini kullanarak yorulma direnimini tahmin etmektedir.

(Majidzadeh, 1971)'e göre, çatlak ilerleme aşamasındaki çatlağın yataylaştığı plastik zonunun boyutu yorulma ömrünün analizinde kritiktir. Eğer çatlak boyundan plastik zonun boyutu küçük ise, bozulmaya yaklaşım için lineer elastik bozulma mekanizmaları kullanılabilir. Eğer daha büyük ise lineer olmayan bozulma mekanizmalarının kullanılması daha doğrudur. İlk durumda, yorulmanın kısa olduğu farzedildiği zaman malzemenin bozulma karakteristiğini kritik gerilme yoğunluğu faktörü K_{Ic} tanımlar. İkinci durumda, elastik olmayan deformasyonun büyük olduğu yerde, çatlağın ilerlemesini tanımlamak için ya J-integral veya C^* çizgi integrali gerekebilir.



Şekil 3.12 Bozulma özelliklerinden faydalanarak yorulma ömrü hesap diyagramları (Salam, 1971)

İkinci durum için, çatlak ilerlemesi modellerinden bir tanesi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dc}{dN} = A^* \left[\frac{j}{(2 * Ue)} \right] \quad 3.6$$

J: yoldan bağımsız mod katsayısı, j-integrali

c: çatlak uzunluğu

Ue: toplam deformasyon enerjisi,

A: malzeme sabiti ve

N: c çatlak uzunluğu arasındaki yük tekerrür sayısı.

Adımlar;

1. J-c eğrileri oluşturulur. Ue bulunabilir.
2. c-N ilişkisi yorulma deneylerinden bulunur,
3. (dc/dN)'e karşı N ilişkisini bulmak için bu ilişki farklılaştırılır.
4. Verilen bir N için c ve dc/dN bulunur.
5. Verilen bir c için $J = 2 * Ue * c$ bulunur.
6. Dc/dN ilişkisi kurulur, bu ilişkinin eğimi $A/2 * Ue$ olmalıdır.

Bu çatlak büyüme modelini oluşturmak için deneysel bilgilere ihtiyaç vardır.

Yararları:

1. Yorulma deneyi için gerekli ihtiyaçlar elimine edilmiştir.
2. Örneğin 40 °F gibi düşük sıcaklıklar için kuvvetli bir çatlak ilerlemesi teorisi açıklanmaktadır.

Sakıncalar:

1. Yüksek sıcaklıklarda, plastik zonun boyutu nedeniyle k_{Ic} için belirlenen değer düz gerilme şartlarından etkilenmektedir ve k_{Ic} bir malzeme sabiti değildir.
2. Sabit çatlama aşaması, uygun ve tam bir yorulma aralığı için tanımlanmayabilir. Stabil olamayan çatlak ilerleme aşaması bilinmez.
3. Bu metotta ölçülmesi gerekli kullanışsız deneysel dataların önemli bir miktarı aşağıda sıralanmıştır.
 - a. Kırılma dayanıklılığı (K_{Ic}).
 - b. Üstyapı çatlaklarının başlangıç boyutları.

- c. Uygulanan yük ve gerilme yoğunluğu faktörü K_1 ile ilişkili kalibrasyon fonksiyonu. Bu fonksiyon üstyapı tabakalarının görünüşü ve yükleme parametrelerine bağlıdır.
- d. Verilen herhangi bir çatlak uzunluğu için gerilme yoğunluğu faktörünü belirlemek amacıyla uygulanan yük ve eğilme momentlerine ihtiyaç vardır. Yükleme durumunun değişkenlerinin ve bu değişkenlerin sırasının yorulma ömrü üzerindeki etkisi henüz tanımlanmamıştır.
- e. Her bir malzeme için yorulma çatlak büyüme kanunu tanımlanmalıdır. Bu şekilde de her bir malzeme için teorik modele gerekli olan sabitler tanımlanmalıdır.

3.7 Trafik Altında Sıkıştırma Deneyi

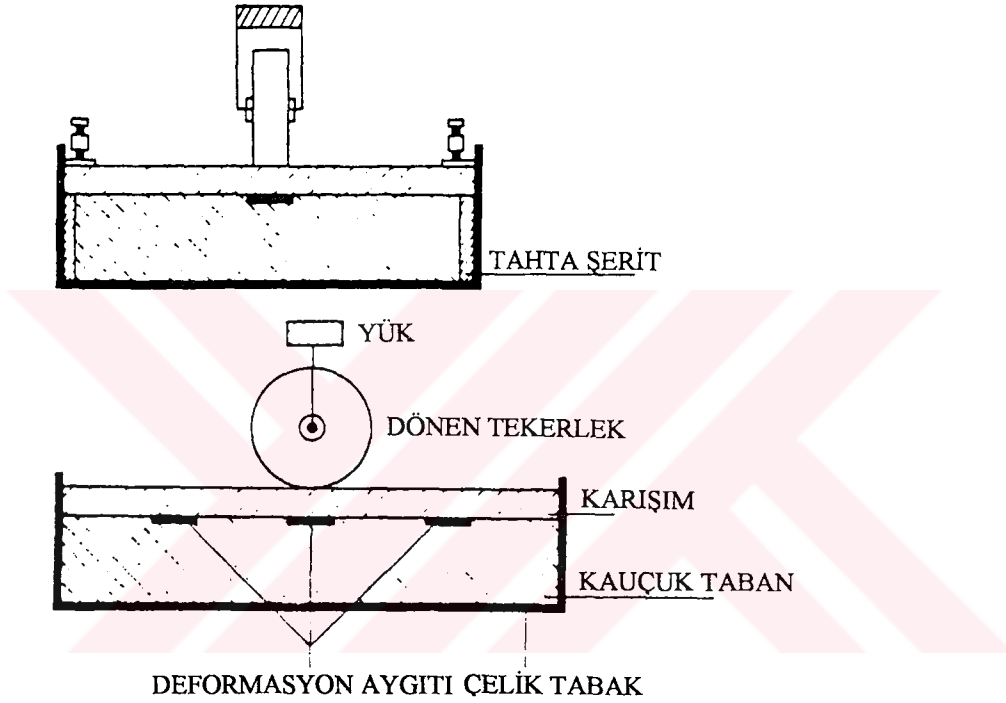
3.7.1 Laboratuvar Deneyleri

Üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerleğin etkisini daha iyi simüle etmek ve çatlak başlangıcı ve ilerlemesini daha iyi anlatmak amacı ve asfalt plakların yorulma karakteristiklerini çalışmak için trafik altında sıkıştırma deneyi geliştirilmiştir (Van Dijk, 1975) (Şekil 3.13). Bu deney aletinde hava basınçlı ve yüklü bir teker bir asfalt betonu plak üzerinde ileri ve geri yuvarlanır. 0.25 m yarıçapında teker 0.60 m uzunlukta ve 0.05 - 0.07 m aralıklı bir genişlikteki yol üzerinde yuvarlanır. Plak bir lastik yatak üzerine desteklenmiştir. Teker temas alanı yük veya tekerin şişkinliğinin değişimine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Uygun ekipmanlar ile ana karakteristikler olan plağın tabanındaki deformasyonlar ve çatlak başlangıcı ve ilerlemesi tespit edilir.

Sonuçlar üç aşamalı yorulma gelişimi olan kılcal çatlaklar (N_1), gerçek çatlaklar (N_2) ve plağın bozulması (N_3) ile tanımlanır.

Bu deneyden (Asfalt betonu kalınlığı 40 mm kalınlıktadır. Tekerleğin temas alanı yaklaşık 25 cm²'dir) bulunan bilgiler van Dijk tarafından sunulmuştur. Onun

sonuçlarına göre üstyapının çatlamasının kontrollü-gerilmeden ziyade kontrollü-deformasyon sonucunda elde edilen bilgiler daha iyi olduğu önerilmektedir. Çalışmalarında yorulma deney sonuçlarında kontrollü-gerilme ve kontrollü-deformasyon durumu arasındaki farklılığı kılcal çatlakların oluşumu ve gerçek çatlaklar aralığı için açıklamıştır.



Şekil 3.13 Trafik altında sıkıştırma deney aletinin şematik gösterimi (Van Dijk, 1975)

Trafik altında sıkıştırma deneyine benzer bir alet Nottingham Üniversitesinde de kullanılmıştır.

Yararları: yararları aşağıda sıralanmıştır.

1. Arazi şartlarını daha iyi simüle etmektedir.
2. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin her ikisi birden görülebilmektedir.

Sakıncaları: sakıncaları aşağıda sıralanmıştır.

1. Deneğin ana sınırlaması tekerin yuvarlanma hızı ile sınırlandırılmıştır.
2. Düşük rijitlikli karışımlar için tekerlek izi önemli olmakta ve yorulma ölçümlerini etkileyebilmektedir.
3. Deneğin süresi uzundur ve özel ekipmana ihtiyaç vardır.
4. Deneğin temel karışım özellikleri ölçülememektedir.

3.7.2 Gerçek –Boyutlu Deneyler

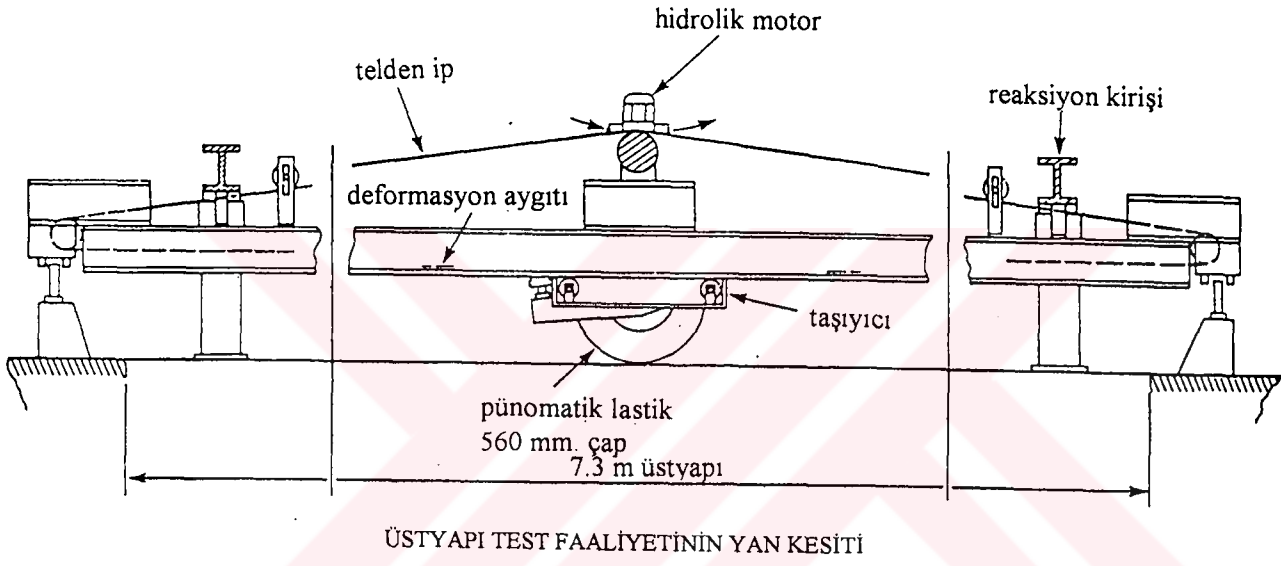
Tam bir arazi simülasyonu sağlayabilmek amacıyla bu deneyler bir kaç farklı ülke tarafından dairesel ve boyuna yollar inşa edilerek geliştirilmiştir. Bunlara en iyi örnekler olarak Nantes (Fransa) ve Washington Eyalet Üniversitesi yakınlarındaki Pullman ve Federal Highway Administration'ın ALF (hızlandırılmış yük) söylenebilir. Yollar sık olarak herbiri farklı yapıda oluşturulmuş kesitlere ayrılmıştır ve ayrıca yükler birkaç çift teker tarafından uygulanmaktadır.

Dairesel yollarda, yüklerin gerçek şartlara uygun olarak uygulanabilmesi için eksantirik olarak hareket edeceği farz edilmiştir. Bu deneye diğer örnekler olarak detayları Şekil 3.14 ve 3.15'de verilen ARRB Avustralya, TRRL İngiltere, Canterbury Yeni Zelanda ve Danimarka verilebilir. Bunların faydaları hakkında bir özet yayın Sparsk (1980) tarafından yayınlanmıştır.

Yararları: tam ölçekli deneylerin faydaları aşağıda sıralanmıştır.

1. Arazi şartlarını mükemmel olarak simüle etmektedirler.
2. Üstyapının yapısındaki değişikliklerin üstyapı performansı üzerinde olan etkisinin sınılanması mümkündür.

3. Tek bir deneyde yorulmanın yanında diğer bozulma şekilleri üzerinde de çalışma imkanı vermektedir (örneğin kalıcı deformasyon v.b.).



Şekil 3.14 Lineer test yolu – Nottingham Üniversitesi (Brown et al., 1977)

Sakıncaları: Bu deneyin sakıncaları aşağıda sıralanmıştır.

1. Başlangıç yatırım, işletme ve bakım masrafları oldukça yüksektir.
2. Tam ölçekli deneylerde temel karışım özellikleri ölçülemediğinden bu deneye paralel olarak destekleyici laboratuvar deneylerine ihtiyaç vardır.
3. Dairesel deneylerde merkezkaç kuvvetinin etkisi nedeniyle yüklü teker hızı sınırlandırılmıştır.

3.8 Deney Metodlarının Değerlendirilmesi

Aşağıda sıralanan kriterler gözönüne alınarak deneylerin beğenilme oranları tespit edilmiştir.

1. Arazi şartlarını simüle etme,
2. Deney sonuçlarının uygulanabilirliği,
3. Basitliği ve
4. Arazi korelasyonudur.

Arazi şartlarını simüle etmesini değerlendirmek için aşağıdaki sıralama izlenmiştir.

1. Numuneler ve yük, arazideki durumu ve karakteristikleri ne derecede simüle ediyor?
2. Geniş bir sıcaklık aralığında parametrelerin ölçümü ne derece de önemli ve güvenli olarak yapılmaktadır?
3. Yük frekansı ve dinlenme periyodları arazideki şartlara ne derecede yakındır?

Deney metodlarını basitliğine aşağıdaki kriterlere göre bakılmıştır.

1. Gerekli ekipmanların karmaşıklığı.
2. Ekipmanların diğer deneyler için kullanılabilme imkanı.
3. Deney için gerekli numune ağırlığı, konfigürasyonu ve sayısı.
4. Yapısal ve karışım dizaynı için ölçülen parametre sayısı.
5. Aynı veya diğer bir ekipmanla ölçülmesi gerekli parametre sayısı.

Deney sonuçlarının uygulanabilirliği ana konumuz olan yorulma ile üstyapının yapısı ve karışım dizaynı için kullanılabilme ihtimali olan sonuçları kapsamalıdır.

Bu çalışmada yer alan herbir deney için yarar, sakınca ve sınırlamalarına ait bir özet tablo tablo 3.1'de verilmiştir. Bu metodlar daha önce sıralanan kriterlere göre değerlendirilmiştir. Arazi korelasyonu için gerekli bilgiler bulunamamıştır, bundan dolayı da bu faktör değerlendirmede gözönüne alınmamıştır.

Yukarıda sıralanan tek bir kritere bağlı olarak sıralama yapılmamıştır. Daha ziyade yorulma direniminin tespitine yönelik gelişmeler ve tüm diğer kriterler göz önüne alınmıştır. Bu amaçlarla, servisteki üstyapıda bağlayıcının etkisini düzgün olarak yansıtacak ve asfalt agrega karışımı analiz sistemi (AAMAS) içerisinde kullanılabilir bir deney geliştirilmelidir. Sonuç olarak yapılan değerlendirmelerde yazarların yapmış oldukları sıralamanın bir birleşimi olan rapor Tablo 3.1'de sunulmuştur.



Tablo 3.1 Test metodlarının kıyaslanması

	Yararları	Sakıncalar ve Kısıtlar	Arazi Koşullarını Temsil Edebilmesi	Basitlik	Genel Sıralama
Tekrarlı eğilme testi	1. İyi bilinen, yaygın 2. Farklı kavramlar için kullanılabilir temel teknik 3. Sonuçlar direkt dizaynda kullanılabilir 4. Gerilme veya deformasyon kontrollü	Masraflı, zaman alıcı, özel ekipman gerekmekte	4	4	I
Direkt gerilme testi	1. Ayrıca yorulma testi yapmaya gerek yok 2. Yorulma testleriyle iyi bir korelasyon sağlıyor	LCPC metodunda: 1. Korelasyonda bir milyon tekrür temel alınmış 2. Sadece 10°C sıcaklık 3. EQI'yı (asfalt tabakası kalınlığını) sadece bir milyon tekrür için kullanması	9	1	I
Dairesel tekrarlı yüklem testi	1. Basit bir yapı 2. Ekipman diğer testlerde de kullanılabilir 3. Çatlamayı tahmin edebilme	1. İki eksenli gerilme durumu 2. Yorulma ömrünü gerçekten aşağı tahmin etmesi	6	2	II
Harcanan enerji metodu	1. Fiziksel bir olguya bağlı olması 2. Harcanan enerji ile N arasında tek bir bağıntı	1. Doğru tahmin için geniş yorulma testi datası gerekli 2. Basitleştirilmiş prosedürler sadece yorulma ömrünün büyüklüğü hakkında genel bir gösterge olması	5	5	III
Kırılma mekanizması testleri	1. Düşük sıcaklıklar için güçlü bir teori 2. Prensip olarak yorulma testleri uygulamaya gerek yok	1. Yüksek ısılarda, K_I bir malzeme sabiti değildir. 2. Çok fazla deneysel data gerekli 3. K_{II} (yırılma modu) datasına ihtiyaç var 4. Sadece stabil çatlama yayılma hesaplanır	7	8	IV
Tekrarlı gerilme veya sıkıştırma testi	1. Eğilme yorulma testi ihtiyaç yok	1. Direkt gerilme testine oranla, zaman alıcı masraflı ve özel ekipman ihtiyacı var	8	3	V

Tablo 3.1 Test metodlarının kıyaslanması (Devamı)

	Yararları	Sakıncalar ve Kısıtlar	Arazi Koşullarını Temsil Edebilmesi	Basitlik	Genel Sıralama
Üç eksenli tekrarlı gerilme ve basınç testi	1. Arazi koşullarını daha iyi temsil etmesi	1. Masraflı, zaman alıcı ve özel ekipman gerekli 2. Yırtılma deformasyonu bilgileri gerekli	2	6	VI
Elastik temelli tekrarlı eğilme testi	1. Arazi koşullarını daha iyi temsil etmesi 2. Numuneler tam destekli oldukları için yüksek ısılarda uygulanabilir.	1. Masraflı, zaman alıcı ve özel ekipman gerekli	3	7	VII
Dönen tekerlek testi (laboratuvar)	1. Arazi koşullarını daha iyi temsil etmesi	1. Düşük rijitlik değeri için yorulma ömrü tekerlek izinden etkilenmekte 2. Özel ekipman ihtiyacı	1	9	VIII
Dönen tekerlek testi (arazi)	1. Gerçek tekerlek yüklemesi altında yorulma ömrünü ifade etmesi	1. Masraflı, zaman alıcı 2. Bir seferde sadece birkaç materyal ele alınabilir 3. Özel ekipman ihtiyacı	1	10	IX

4. BOZULMA KAVRAMI

Yorulma çatlağı bir gerilme olayı olarak gözönüne alınmaktadır. Bu olay malzemenin hemen bozulmasına neden olacak gerilmeden daha düşük olarak çekme gerilmesinin tekrarlı olarak uygulanmasıdır, bunun sonucunda da malzeme içerisinde yorulma çatlakları başlar ve ilerlemeye devam eder. Başlangıç yorulma araştırmalarında, yorulma ömrü ile çekme deformasyonları arasında çekme gerilmesi ile olan korelasyonundan daha iyi korelasyonlar bulunmuştur, bu korelasyonda aşağıdaki şekilde karakterize edilmektedir.

$$N_f = a * \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^b \quad 4.1$$

Nf=Yorulma ömrü

ϵ_t =Uygulanan çekme deformasyonu

a,b =Laboratuar deneylerinden ile belirlenmiş sabitler.

Bu denklem üstyapı dizayn ve analizinde kullanılabilir ve servisteki üstyapıda trafik etkisi ile oluşan çok boyutlu gerilme durumundaki komplekslikten belirlenen ve maksimum teorik çekme deformasyonu olarak farz edilen ϵ_t bozulmayı belirtir. Bu denkleme, yük frekansı ve karışım sıcaklığındaki değişiklikler de göz önüne almak amacıyla bir karışımın esnekliği terimi ilave edilmiştir. Bu durumda denklem;

$$N_f = a * \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^b * (S_{mix})^c \quad 4.2$$

şeklini almaktadır. Burada;

S_{mix}=Karışım esneklik modülü ve

c=Üçüncü kalibrasyon katsayısıdır.

Denklem uygulanan deformasyonun spesifik bir değeri için kullanılabilir. Servisteki üstyapılar için, deformasyonlar sonraki yer değiştirmeler, teker basınçları, aks yükleri ve tiplerinden dolayı farklılık göstererek yanıltıcı olabilmektedir. Buna göre karışık yüklerin bozucu etkilerini bir araya getirmek için bazı bağlantılara gerek vardır. Bu bağlantıların en yaygın olanı;

$$\frac{n_1}{N_{1f}} + \frac{n_2}{N_{2f}} + \dots + \frac{n_i}{N_{if}} + \dots + \frac{n_m}{N_{mf}} \quad 4.3$$

i=üstyapının kritik kesitinde i. seviyede uygulanan deformasyon

n_i =i. deformasyonun tekrar sayısı

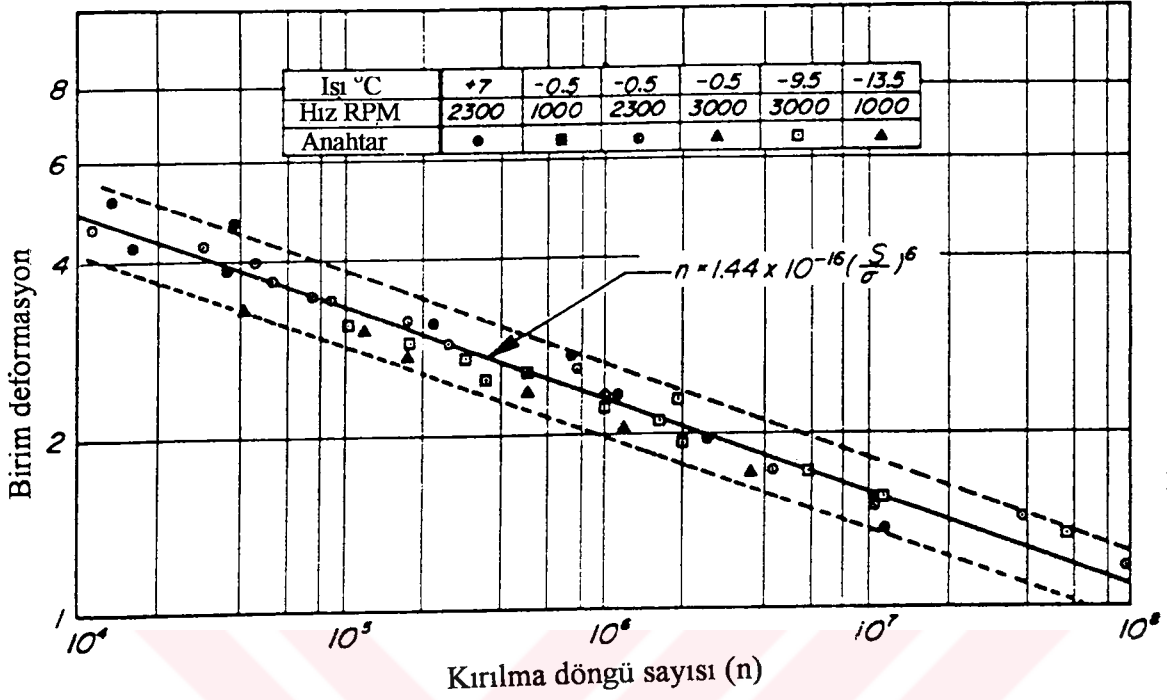
N_{if} =çevre etkileri katılmaksızın i. seviyedeki deformasyonun bozmaya sebep olan tekrar sayısıdır.

Lineer eşitlikte tekrar oranlarının toplamının bire ulaşması durumunda üstyapının bu karışık yük uygulaması altında bozulduğu kabul edilir.

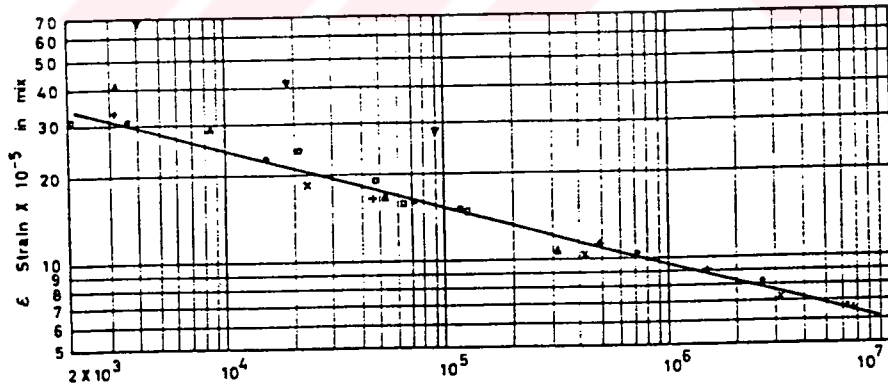
Bu bölümün asıl amacı yorulma bozulması ve karışık yük altında bozulma toplamalarının daha iyi anlaşılması için yapılan araştırmaları ortaya koymaktır.

4.1 Deformasyon

Kontrollü gerilme sonuçlarını esas alır ve Saal ve Pell (1960) deney sıcaklığı ve yük frekansı bağımsız yorulma ömrü ile deformasyon arasında tek bir gerçek ilişki kabul eder (Şekil 4.1). Deneyler bu ilişkiyi esas alarak kurulur ve nispeten küçük aralıklı düşük sıcaklıklarda (-13.5 ile 7 °C) yapılmaktadır. Pell daha sonraları tek deformasyon ilişkisinin 0 ile 20 °C sıcaklık aralıkları içinde uygulandığını göstermiştir. Bazı çatlak yayılmasının olduğu ve lineer olmayan elastik davranışın görüldüğü 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda daha uzun ömürlerin olduğu delilleri vardır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Çeşitli hız ve sıcaklıklarda yorulma testi sonuçları (Saal ve Pell, 1960)



Kırılma döngü sayısı N_s

Test Series	F	G			
Temp. °C	+10	0	+10	+20	+30
Symbol	+	x	.	▲	▼

Test Series	P
Speed revs/min.	Varies
Symbol	□

Şekil 4.2 Çeşitli karışımlar için deformasyon yorulma ömrü testleri (Pell ve Taylor, 1969)

Witczak'a göre tüm araştırmacılar raporlarında tek deformasyon kriterinin mevcudiyetini sürekli, sinüzoidal yükde uygulamıştır. Diğer bir deyişle, bunlar herbir sıcaklık kombinasyonu ve yük frekansı için dinlenme periyodlu vuruş yüklemesi kullanarak farklı yorulma ömrü deformasyon ilişkisini bulmuşlardır. Yorulma deneyinde karışım direniminin tepkisinin lineer olmaması gibi yük durumları olduğu zaman, şayet deformasyonlar doğrudan ölçü aletinden alınmış veya deformasyon ölçümlerinden hesaplanan rijitlik kullanılmış ise yorulma ilişkileri birbirlerine paralel değildir. Diğer bir deyişle, paralel eğriler, deformasyonlar gerçek lineer olmayan davranış ihmal edilerek Shell nomograflarından veya bunlar dinamik modül deneyinin tipik düşük seviyedeki gerilme durumlarından alınmış ise bulunabilir.

4.2 Deviatör Gerilme

Dairesel deneylerde yorulma ömürleri diğer metodlara göre daha küçüktür. Porter ve Kennedy (1975) bu farklılığı numunenin iki eksenli gerilmeye maruz kalmasından kaynaklandığı şeklinde belirterek yorumlamışlardır. Dairesel deneylerde σ_1 yerine gerilme farkı $\sigma_1 - \sigma_3$ kullanılması durumunda diğer metodlardan elde edilen eğrilere yakın eğri bulunmaktadır (Şekil 3.4). Buna göre, daha iyi bir yorulma direnimi tahmini için birleştirilmiş gerilme teorisi kullanılmalıdır. Kennedy vd. maksimum kayma gerilmesi teoreminin bir uygulaması olan mohr dairelerini esas alan birleşmiş gerilme teorisini kullanmıştır. Birleşmiş gerilme deviatör gerilme terimi veya gerilme farklılığı (maksimum teorik gerilme – minimum teorik gerilme) olarak verilmektedir. Dairesel deneydeki gerilme farklılığı (bir eksen üzerindeki çekme ve diğerü üzerindeki basınç gerilmesi) yaklaşık olarak çekme gerilmesinin dört katıdır.

Malzemelerin tepkilerini analiz etmek de değerlendirilme kriteri olarak sekiz yüzlü kayma gerilmesi gibi daha kompleks gerilme durumları değerlendirilebilir. Sekiz yüzlü gerilme farklılıkları teorisi deviatör gerilme teorisi farklılıklarından daha azdır (yaklaşık olarak çekme gerilmesinin 3.6 katı).

Bunlara rağmen bu yaklaşımdaki değer gerçektir ve o iki eksenli gerilme durumları için bir bozulma alternatifi olarak önerilir.

4.3 Deformasyon İşi

Çok eksenli gerilme durumu altında asfalt karışımların yorulma direnimini tanımlamak için bu kavram Deen ve onun çalışma grubu tarafından ortaya atılmıştır. Bir noktadaki bilinen deformasyon enerjisi yoğunluğunun kullanımındır ve bir elastik malzeme için aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\delta W = \frac{1}{2} * \lambda * e^2 + G * (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2) + \frac{1}{2} * G * (\lambda_{xy}^2 + \lambda_{yz}^2 + \lambda_{xz}^2) \quad 4.4$$

Burada;

δW = Birim hacim için iş veya deformasyon enerjisi yoğunluğu

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$\varepsilon_x, \text{vd.}$ = normal deformasyonlar

$\gamma_x, \text{vd.}$ = kayma gerilmeleri

$$\lambda = \frac{E \mu}{(1 + \mu) + (1 - 2 * \mu)} \quad 4.5$$

E,G = Sırasıyla elastik ve kayma modülleri

μ =Poisson oranı

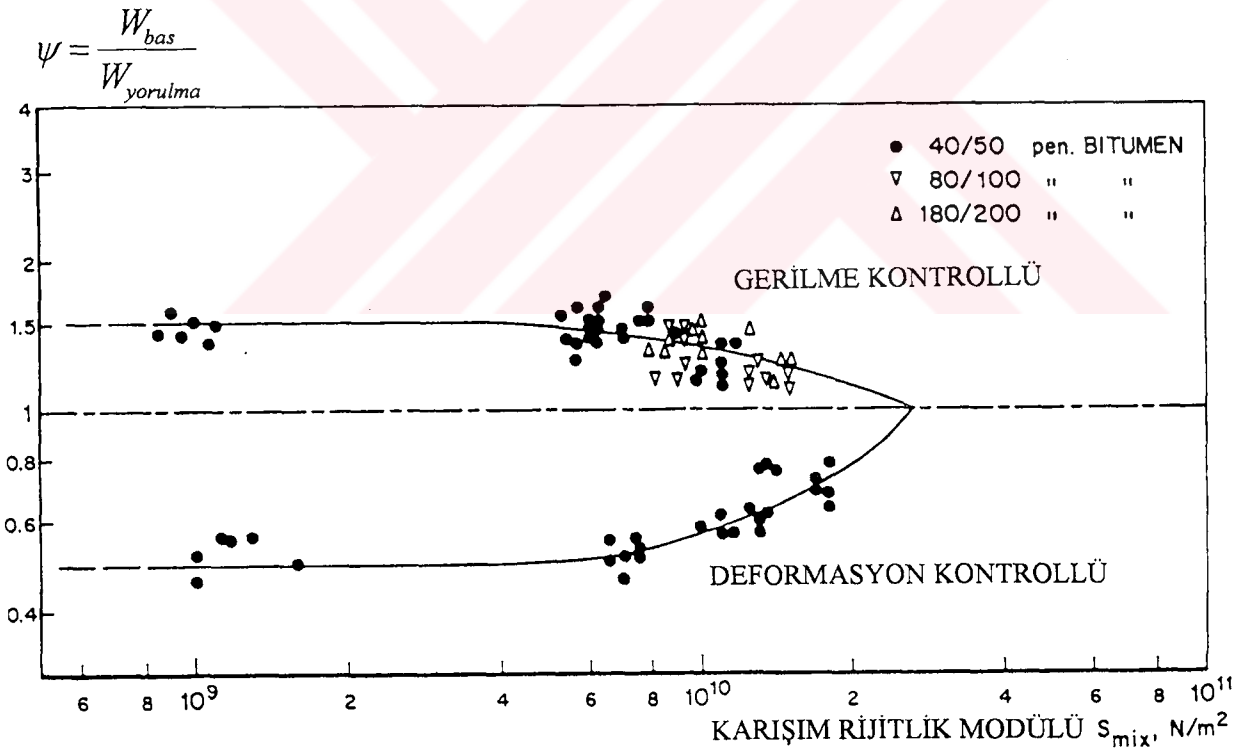
Sabit bir üstyapı yapısı içerisindeki herhangi bir nokta için üstyapının yüke karşı elastik davranış gösterdiği kabul edilerek bu parametreler hesaplanabilir (ELSYM bilgisayar programından).

Deformasyon işi ϵ_w ;

$$\epsilon_w = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta \cdot W}{E}} \quad 4.6$$

4.4 Harcanan Enerjinin Sabitliği:

Hasarın yığılımlı toplamına alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu metotta kırılmaya sebep olan döngü sayısı, tekrarlı yükleme sırasında harcanan enerjiyle ilişkilendirilmiştir. Erişilebilen bilgilerde (şekil 4.3) yükleme tipinin, sıcaklığın ve yükleme frekansının, kırılma için gerekli olan enerji üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak bir çok koşula bağlı olan karışımın yorgunluk davranışını çok basit yorgunluk deneyleriyle ifade etmek tartışılabilir.



Şekil 4.3 Enerji oranı ve karışım rijitliğinin asfalt betonu ile olan ilişkisi (van Dijk, 1975)

Sinüzoidal yükleme durumunda harcanan başlangıç enerjisi şöyle ifade edilmiştir.

$$w_i = \pi \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin \phi_o \quad 4.7$$

Burada σ_o başlangıç gerilme değeri, ε_o başlangıç deformasyon modülünü ϕ_o ise gerilme ile deformasyon arasındaki faz açısını göstermektedir.

Yorgunluk testlerinde faz açısı sürekli değişir, ve bunun yanında yorulma ömrü belirli aralıklara bölünmelidir (faz açılarının sabit kaldığı noktalarda). Bu durumda o zaman diliminde harcanan enerji w_i , ve toplam enerji şöyle hesaplanmaktadır.

$$w_{fat} = \sum_{i=1}^n w_i \quad 4.8$$

Yükleme sayısı ile harcanan enerji arasındaki ilişkiyi oraya koyan tek bağıntı şöyledir:

$$W_{total} = A \cdot N^z \quad 4.9$$

A ve z karışım özelliklerini temsil eden sabitlerdir.

Elastik bir malzeme için harcanan enerji, bükülmelerden kaynaklanan deformasyon enerjisine eşittir, δw_D . Bu parametre toplam deformasyon enerjisinden veya deformasyon enerjisi yoğunluğundan, δw hacimsel değişmeye sebep olacak enerjinin çıkarılmasıyla bulunabilir (4.4'de belirtildiği gibi).

$$\delta w_D = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \quad 4.10$$

Bu denklem x yönündeki bir gerilme için şöyle basitleştirilmiştir:

$$\delta w_d = \frac{1+\mu}{3E} \cdot \sigma_x^2 \quad 4.11$$

Araçlar ve Test Aşamaları:

Harcanan enerji kavramını inceleyen testler genellikle eğilme deneyleridir. Orta noktalı ve üç noktalı eğilme testleri kullanılabilir. Yükleme tipi ise gerilme-kontrollü veya deformasyon-kontrollü olabilir. Dijk tarafından konsol yükleme deneylerinde trapez formunda numuneler kullanılırken (test ısısı 50°C'ye kadar), orta noktalı eğilme deneylerinde dikdörtgen numuneler kullanılmıştır (20°C' deney ısisına göre). Bu çalışmalarda 0.1 ile 100Hz arasındaki frekanslarda sinüzoidal yüklemeler yapılmıştır. Yükleme periyodunun dinlenme periyoduna oranı 1/100'dür.

Enerji Göz Önünde Bulundurarak Yorulma Ömrünün Tayini:

Kademeli olarak yorulma ömrünün tahmin edebilme prosedürü şöyledir:

1. Eğilme yorulma testini yaparak, faz açısı ϕ rijitliği elde edilir, S_0 .
2. Aşağıdaki bağıntıdan enerji oranını Ω hesaplanır.

$$\Omega = \frac{w_i}{(w_{total} / cycle)} = \frac{[\pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \sin \phi_0]}{A \cdot N^{(z-1)}} \quad 4.12$$

$$N = \left[\frac{(\pi \cdot S_0 \cdot \sin \phi_0)}{A \cdot \Omega} \right]^{\frac{1}{z-1}} \quad 4.13$$

Sonra

$$\epsilon_p = \left[\frac{(A \cdot \Omega)}{\pi \cdot S_0 \cdot \sin \phi_0} \right]^{1/2} \cdot N^{[(z-1)/2]} \quad 4.14$$

ve

$$W_{toplam} = \sum_{i=1}^n W_i \quad 4.15$$

ϵ_p müsaade edilebilir deformasyon ve S_0 başlangıç rijitlik modülü, (σ_0/ϵ_0)

Şekil 4.3'de Ω ile karışım rijitliği arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Rijitlik modülünün fonksiyonu olarak, toplam yorulma davranışı eğer $\phi=f(S_{mix})$ ve $\Omega=f(S_{mix})$, A ve Z parametreleri bilindiğinde kolayca tespit edilebilir.

Genellikle bu tip bilgiler kolay elde edilemez. Bu gibi durumda şunlar tavsiye edilir:

1. Sorgulanan karışıma benzeyen başka bir karışımın bilgilerini kullanmak veya
2. Bazı yorulma testleri uygulayarak güvenilir sonuçlar almak veya
3. Aşağıdaki basit metodu kullanmak
 - a) Nomoğrafta verilen başlangıç S_{mix} ' e karşılık gelen ϕ 'yi bul.
 - b) Nomoğraftan S_{mix} 'e denk gelen Ω bul
 - c) $\Omega= 1.22$, $z=0.66$ ve $A= 4.10^4$ j/m³'ün mutlak değeri olarak, müsaade edilebilir deformasyon ile yorulma ömrü arasındaki ilişki, verilen başlangıç rijitliği ve faz açıları kullanılarak şöyle elde edilebilir.

$$\epsilon_p \cdot S_0 \cdot \sin \phi_0 \cdot N^{0.34} = 1.55 \cdot 10^4 \quad (4.16)$$

Bu bağıntılar yorulma ömrü için kesin tahminlerde kullanılamaz fakat genel bir fikir vermesi açısından faydalıdır. Ayrıca yukarıdaki bağıntı sinüzoidal yükleme tipinde geçerli olduğu için diğer yükleme tiplerinde bu bağıntı değişecektir.

Şu zamana kadar enerji göz önünde bulundurularak yapılan testlerde sadece eğilme yorulma testleri kullanılmasına rağmen , bu prensipler diğer tipteki yorulma testleri

içinde kullanılabilir (destekli eğilme gibi). Üstyapı dizaynına bu prensipleri uygulamak için daha ileri çalışmalar gerekmektedir.

Yararlar:

1. Van Dijk'e göre (1975), bu metodun en büyük yararı yükleme tipinin, sıcaklığın, yükleme frekansının, ve dinlenme periyodunun harcanan toplam enerji üzerinde belirgin bir etkisi olmadığıdır. Bozulmaya sebep olacak yükleme sayısı, test sırasında harcanan enerji miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Bu eğer gerçektende doğrulanırsa laboratuvar testlerinde büyük bir azalmaya ve yükleme tipini seçme durumundan da kurtarmış olması büyük bir faydadır.
2. Bu metod visko-elastik malzemelerin yorulma davranışını tekrarlı yüklemeler sonucunda oluşan bükülmelerin toplamıyla ifade eden fiziksel bir olaya dayanmaktadır.
3. Gerilme ve deformasyon kontrollü eğilme her ikisi için harcanan toplam enerji ile yükleme sayısı arasında tek bir bağıntı ortaya koymuştur.
4. Yorulma ömrünün tahmini, başlangıç rijitliği ve faz açısı biliniyorsa, ilk yaklaşım olarak mümkün olabilmektedir.
5. İlk yaklaşım olarak, yorulma etkisini göz önünde bulunduran bir metod olması açısından asfalt betonu dizaynının da kullanılabilir

Sakıncaları:

1. Kesin bir yorulma davranışı detaylı testler yapılmadan elde edilememektedir

2. Burada basitleştirilmiş test prosedürü bir dizayn tekniği olarak ele alınamaz. Sadece verilen asfalt karışımının yorulma ömrünün genel bir değerini vermektedir

4.5 Deformasyon İşi ve Harcanan Enerji

Deformasyon işi, deformasyon enerji yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğundan, bu iki kavramı entegre ederek yorulma kavramı içerisinde birleştirmek bir değer ifade edebilir.

Tek eksenli testte, statik yükleme altındaki elastik bükülme enerjisi şöyledir:

$$\delta.w_b = (1/3) \cdot (1 + \mu) \cdot \sigma \cdot \varepsilon \quad (4.17)$$

Burada μ Poisson oranı, σ gerilme ve ε deformasyonu ifade etmektedir.

Yaklaşık harcanan bükülme enerjisi (Kunst,1989) tarafından şöyle belirlenmiştir.

$$\delta.w_d = 2 \cdot \pi \cdot \sin\phi \cdot \delta w_B \text{ veya}$$

$$\delta.w_d = 2/3 \cdot (1 + \mu) \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sin\phi \quad (4.18)$$

Burada ϕ faz açısını ifade etmektedir. $\delta.w_B$ çok katmanlı programlardan faydalanarak hesaplanabilir, ϕ ise Dairesel Eğilme deneylerinden elde edilebilir.

Deformasyon işi, eğilme deformasyonunun yorulma davranışını açıklamasına bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Deformasyon işi parametresi üstyapı dizaynında kullanılmaktadır ve şu şekilde ifade edilmektedir (Deer, et al;1980):

$$e_w = \left[\frac{2 \cdot \delta \cdot w_B}{S_{mix}} \right]^{0.5} \quad 4.19$$

Tek eksenli statik yüklemeli testte, deformasyon işi şöyle ifade edilebilir:

Ve $\mu = 0.35$ için

$$e_w = \varepsilon \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (1 + \mu) \right]^{0.5} \quad 4.20$$

$$e_w = 0.95(\varepsilon)(4.21)$$

$$W_{total} = \sum_{i=1}^N \delta \cdot w_D = \frac{2}{3} (1 + \mu) \cdot A \cdot N^2 \quad 4.22$$

Yukarıda bahsedilen denklemlerden ve 4.6 denkleminde toplam harcanan bükülme enerjisi şöyle ifade edilebilir:

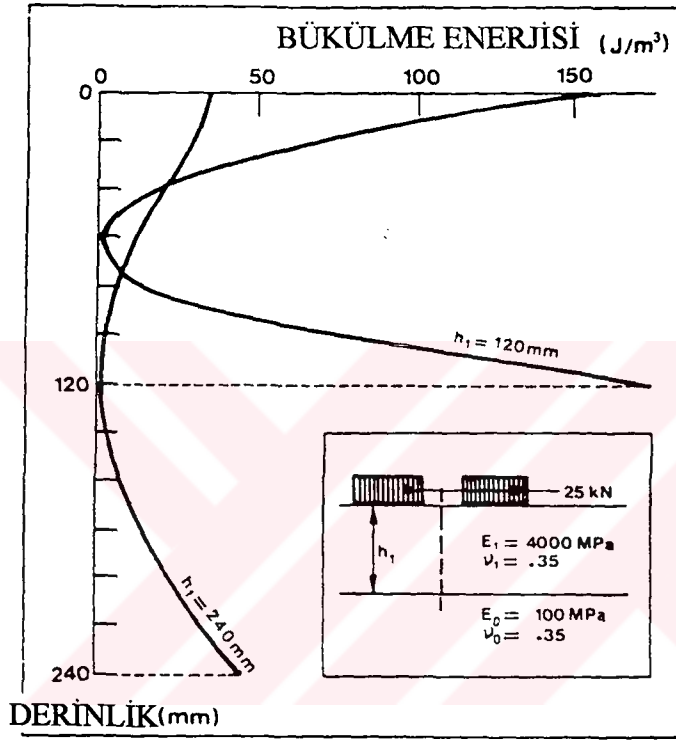
Harcanan enerji metodunda, deformasyon işi kavramını kullanarak, tahmini üstyapı ömrü:

$$N = \left[\frac{3 \cdot S_{mix} \cdot \pi \cdot \sin \phi \cdot e_w^2}{2 \cdot (1 + \mu) \cdot A \cdot \Omega} \right]^{\frac{1}{z-1}} \quad 4.23$$

Bu bağıntı ile 4.8 eşitliği arasında en büyük fark eğilme deformasyonu ε_0 yerine deformasyon işinin ε_w konulmasıdır. Trafik yüklerine maruz asfalt kaplamalı üstyapılardaki çok çeşitli gerilme deformasyon koşullarını baz alan (Kunst, 1989; Gerritsen, 1987) analizlerde, bound tabakasının altındaki deformasyon işi ile yatay gerilme deformasyonu arasında çok küçük farklar olduğu, bunun yanında asfalt yüzeyinde bu iki parametre arasında büyük fark olduğu görülmüştür.

Bu fark lineer elastiki çok katmanlı sistemlerde ki, üstyapı sistemindeki yüklemeye bağlı bükülme enerjisinin tabanın alt katmanındakine eşit olması gerçeğine

dayanmaktadır (Şekil 4.4 Derritsen, et, al,1987). Bu şekle göre, asfalt tabakasının her iki yüzeyinde bükülme enerjisinin büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 Bükülme enerjisi (Garretsen et al.,1987)

5. DENEYSEL ÇALIŞMA İLE ARAZİ PERFORMANSI İLİŞKİSİ

Yorulma deneylerinde en önemli problemlerden birisi laboratuvar deneyleri ile arazi koşulları arasında anlamlı bir ilişki kurmaktır. Yorulma ömrünü gerilme kontrollü deneylerden elde edilen sonuçlar arazi performansının daha altında tahmin etmektedir.

Yorulma kırılması genellikle asfalt tabakasının alt yüzeyinde oluşan eğilme gerilmesi deformasyonunun şiddetine bağlıdır. Buna rağmen bazı durumlarda bu tabakanın daha üst kısımlarında hatta asfalt yüzeyinde bile olabilir.

5.1 Dönüştürme Faktörü

Laboratuvar ve arazi deneyleri arasındaki farkı ortaya koyabilmek için, dönüştürme faktörü laboratuvar yorulma özelliklerini yerindeki performansına benzetebilmek için gereklidir. Dönüştürme faktörü test tipine, test koşullarına, ve arazi koşullarına göre farklı değerler alabilmektedirler.

Değiştirme faktörü ayrıca test konfigrasyonuna ve yükleme tipine de bağlı olmaktadır. Tekrarlı gerilmeye maruz tutulan bir numune, doğrudan eğilmeye tabi tutulan numuneye oranla yüzde elli daha fazla yorulma ömrüne sahiptir (Bonnot, 1972). Aynı karışım için gerilme kontrollü deneye oranla deformasyon kontrollü deneylerde değiştirme faktörü daha küçük olmaktadır.

Deney sıcaklığının da önemli bir etkisi olduğu gerçektir (Rao, 1989). Görünen o ki, yüksek sıcaklarda, laboratuvar yorulma dataları için geçerli olan değiştirme faktörleri, düşük ısıda olanlara oranla daha küçüktür. Bunun yanında değiştirme faktörü asfalt tabakasının kalınlığına da bağlıdır, asfalt tabakası kalınlığı arttığında faktöründe değeri artmaktadır.

5.2 Üstyapı Analizinde Temel Karışım Özellikleri

Yorulma deneyleri sonucunda tanımlanan temel “parametre”, yorulma ömrü ile bozulma olgusu arasındaki ilişkiyi (maksimum gerilme deformasyonu gibi) ortaya koymaktadır. Aşağıdaki adımlar bu bilgilerin asfalt dizaynında ne şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

1. Mühendis öncelikle üstyapının konumunu tanımlamalı ve dizayn ömrü boyunca olması beklenen ortalama aylık hava sıcaklıklarını tahmin etmelidir (OAHS).
2. Üstyapı tipi: Uygun agrega kullanılarak asfalt kaplamalı üstyapı tipi seçilmelidir.
3. Trafığın tahmini: Mühendis eşdeğer dingil yükü olarak toplam trafiği tahmin etmek durumundadır.
4. İlk Deneme Kalınlığı: Deneme kalınlığı MS-1 el kitabındaki abaklardan (Asphalt Institute), yada diğer uygun prosedürlerden seçilebilir.
5. Ortalama Aylık Üstyapı Sıcaklığının Hesaplanması (OAÜS): Birinci adımda elde edilen OAHS değeri ile dördüncü adımda elde edilen asfalt kalınlığı kullanılarak OAÜS hesaplanabilir:

$$OAÜS = OAHS \left[1 + \frac{1}{(Z + 4)} \right] - \left[\frac{34}{(Z + 4)} \right] + 6 \quad 5.1$$

Z= h/3 h: asfalt tabakası kalınlığı in. OAÜS ve OAHS F° cinsinden.

Bu formül üstyapının üçte bir derinliğindeki ortalama üstyapı sıcaklığını vermektedir. Genellikle maksimum eğilme deformasyonu asfalt tabakasının altında oluşur.

6. Yorulma Testi: Yukarıda hesaplanan OAÜS' ü temsil eden, iki ayrı sıcaklıkta yorulma testleri yapılır.
7. Değişirme Faktörü: Laboratuar test datalarından gerilme veya deformasyon yorulma ömrü elde edilir. Laboratuar koşulları ile arazi koşulları arasındaki farkı yansıtacak değişirme faktörü tespit edilir.
8. Asfalt Beton Tabanında ki Gerilme Basıncı: Laboratuar yorulma ömrü bilgilerden proje trafiği değerinde, asfalt betonu alt yüzeyinde oluşan basınç veya deformasyon tanımlanır.
9. Asfalt Beton Tabakası Kalınlığı: Asfalt betonu kalınlıkları gerekli abaklardan tespit edilir.
10. Kümülatif Hasar Hipotezi: Verilen ay içindeki gerçek kümülatif standart dingil yükü sayısının, muhtemel dingil yükü sayısına oranı, her bir ay için parça parça hesaplanır. Oniki ay için her ayın toplamı hesaplanır ve dizayn kalınlığı hesaplanır.

6. İSTANBUL'DA ÜRETİLEN ASFALT BETONUNUN YORULMA ÖMRÜ

İstanbul'da üretilen asfalt betonunun yorulma ömrünü hesaplamak için araştırmacılar tarafından geliştirilen bazı korelasyonlar ve basitleştirmeler kullanılacaktır. Bundan dolayı öncelikle bu korelasyon ve basitleştirmeler açıklanacak, daha sonra Nottingham araştırmacılarının, Shell'in ve Asfalt Enstitüsünün geliştirdiği formüllerle yorulma ömrü hesaplanacaktır.

6.1 Korelasyon ve Basitleştirmeler:

Yorulma direncine göre tasarlanmış karışımlar hazırlayabilmek için kayda değer çaba ve masraflarla konvansiyonel laboratuvar prosedürleri geliştirilmiştir. Burada bahsedilecek olan alternatif deney prosedürleri bütün bu test ve analiz aşamalarını kolaylaştırabilecek potansiyele sahiptir.

6.1.1 Doğrudan Gerilme Testi:

Doğrudan Gerilme Testini yorulma direnci davranışı ile ilişkilendiren metodolojiyi LCPC (Bonnot, 1986) geliştirmiştir. Şekil 6.1 deney aletinin şematik şeklini göstermektedir. LCPC prosedüründe ki tek eksenli gerilme deneyinde 80 mm. çaplı ve 200 mm. yükseklikte silindirik numuneler kullanılmıştır. Bir grup asfalt betonu karışımı için hem tek eksenli gerilme testi hem de yorulma eğilme testi uygulanmıştır. Bir milyon yükleme döngüsünde kabul edilebilir bir deformasyona denk gelen gerilme e_6 doğrusal kayıp $(1 - \tau)$ ve S modülü ile bulunmuştur.

$$e_6.T = 10^{-4} (a_0 + a_1 + (1 - \tau) + a_2 \cdot 10^{-10} \cdot S) \quad (6.1)$$

Burada:

$e_6.T$: Bir milyon tekrarlı yüklemeye, eğilme deneyi yüklemesi deneyinde, kabul edilebilir bir deformasyona gerilmesinin tahmini değeri (10^0C sıcaklık, 25 Hz. frekans).

τ : Non-lineerlik faktörü (5.10^{-4} in. deformasyona karşılık gelen rijitlik, 0 deformasyon düzeyindeki rijitlik).

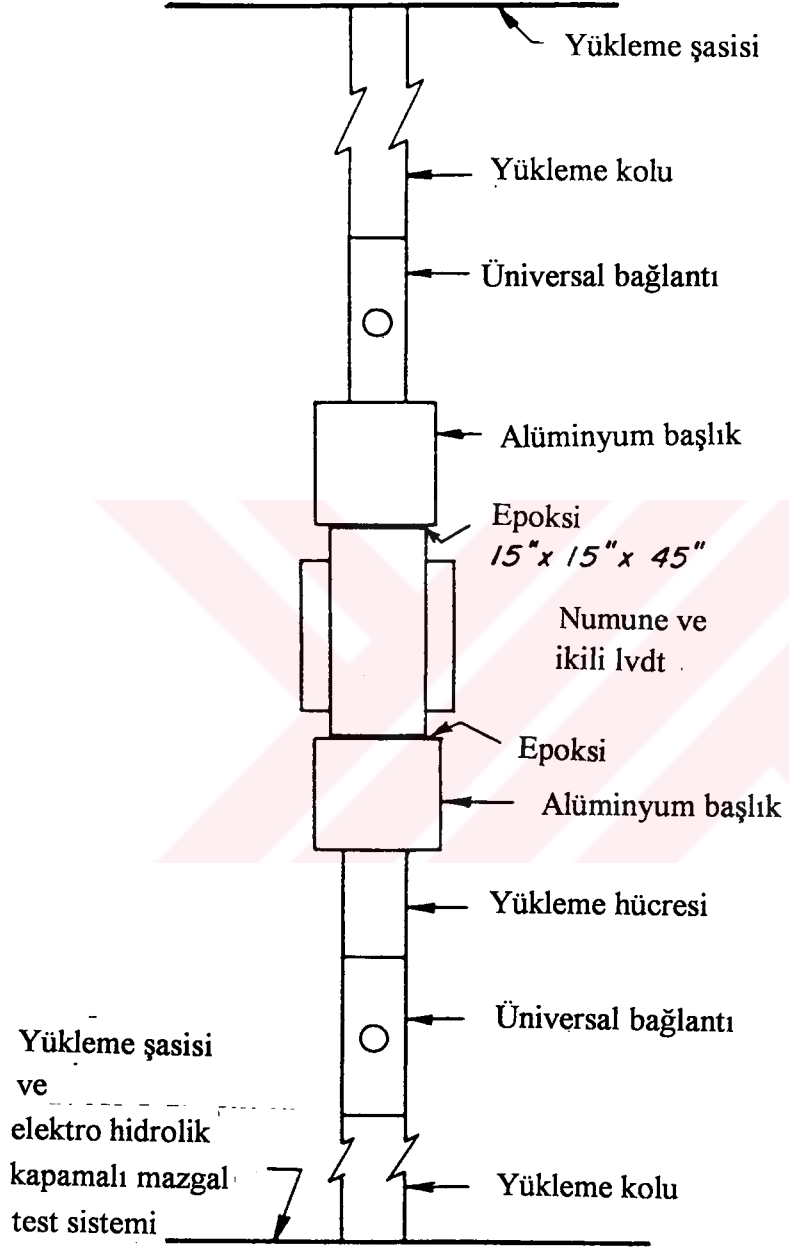
($1- \tau$): Lineerlik kaybı.

S: 10^{-4} in./in. deformasyon düzeyindeki rijitlik, her 300 saniye yükleme zamanı ve 0^0C 'de doğrusal kayıpların ve rijitliklerinin ölçülmesi gerekmektedir

Doğrudan gerilme testinde tüm numuneler çeşitli yükleme oranlarında ve 4 değişik sıcaklıkta (-10^0C ile 20^0C arası) teste tabi tutulmuşlardır. Doğal olmayan bir hasar vermemek için yüklemeler, zaman ve ısıya bağlı olan modülü tanımlamak üzere, küçük bir deformasyon alanına uygulanır, daha sonra non-lineerlik faktörünü bulmak için kırılma noktasının bulunduğu büyük deformasyon alanına uygulanır.

Fransız karışım değerlendirme metodu şu adımları takip etmektedir:

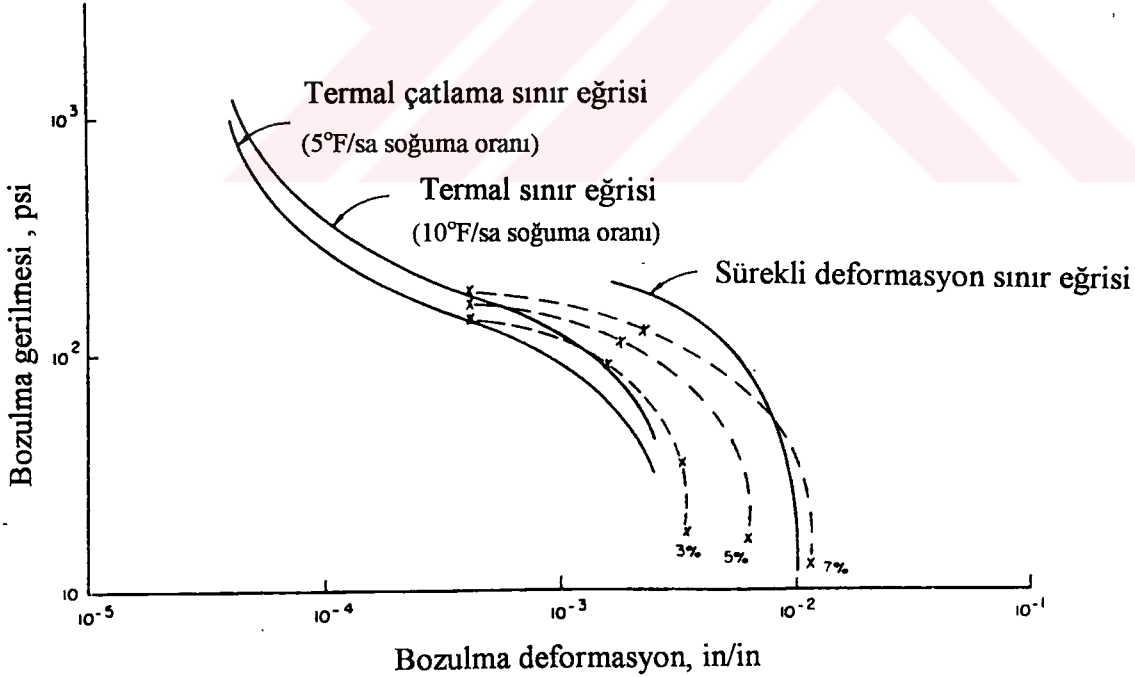
1. Doğrudan gerilme testini uygulamak, özellikle ard arda 26 testi tüm numunelere uygulamak.
2. Doğrudan gerilme testi sonucunda lineer kayıp ve rijitlik değerinin hesaplanması.
3. Korelasyon denkleminde (Denklemler 6.1) bir milyon yük tekrarına denk gelen müsaade edilebilir deformasyonunun $e_6.T$ hesaplanması.



Şekil 6.1 Doğrudan gerilme test aparatı (Epps, 1969)

4. Elastik iki katmanlı bir bilgisayar programı kullanarak ve 10^0 Cefektif sıcaklık ve 0.02 saniye yükleme zamanına denk gelen IQE katsayısı (Elastic Quality Indicator, Elastik Kalite Göstergesi, 130 KN ve 100 Mpa altında bir milyon yük tekrarında bitümlü asfalt betonunun kalınlığını veren değer). IQE değeri bitüm kalitesi arttıkça azalmaktadır.
5. Fransa koşulları için 10^0 c ısı kabul edilebilir olmasına rağmen yıllık ısıyı temsil eden ikinci bir IQE tanımı yapılabilir ($e_6.S^{1/2}$)

Şunu da kaydetmek gerekir ki, doğrudan gerilme deneyleri (Epps, 1969 ve Rao, 1989) gibi araştırmacılar tarafından şekil 6.2 kullanarak sabit bir deformasyon oranında gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmacılar test sonuçlarını yorulma davranışı ile ilişkilendirmişlerdir.



Şekil 6.2 Doğrudan gerilme test aparatı (Little ve Richey, 1983)

Bu yaklaşımın yararları:

1. Prensip olarak, yorulma deneyinin uygulama ihtiyacı ortadan kalkmakta, denklem 6.1'deki kalibrasyon katsayıları, karışımın değişmez sabitleri olarak kabul edilmektedir.
2. Bir milyon yükleme döngüsünde Fransız tecrübesine dayanarak doğrudan aksenal gerilme ile eğilme deformasyon yorulma deneyi arasında büyük bir korelasyon vardır.
3. Doğrudan gerilme testinde, numune kırılması düzgün bir gerilme (veya deformasyon) bölgesinde başlamaktadır.

Sakıncalar:

1. Yorulma ömrünü tahmin için kullanılan gerilme testinden elde edilen korelasyon sadece kabul edilebilir deformasyon seviyesinde bir milyon yükleme döngüsü için hesaplanmıştır. Yorulma ömrü eğrilerinin eğimlerini kesin olarak tahmin etmek çok büyük zorluklar getirmektedir.
2. Metod, asfalt betonunun eşdeğer ısısını 10°C olarak kabul etmiştir. Bununla birlikte, bu metodun diğer ısı derecelerinde uygulanabilir olması için çalışmalar yapılmalıdır

Tartışma:

LCPC metodu farklı bitümlü karışımları karşılaştırma açısından başarılı olsa da, yorulma ömrünün tahmini veya yorulmaya göre üstyapı dizaynı gibi çok yönlü konularda kullanılmada yetersiz kalmaktadır. Bununla beraber, yorulma ömrünü basit bir testle tahmin edebilme potansiyeli ile doğrudan gerilme testinde ölçülen yüksek korelasyon (yorulma ömrü ve parametreleri) çok önem arzemektedir.

Bu prensibi pratik bir metoda dönüştürmek için, yorulma eğilme testi sonuçları ile doğrudan gerilme testleri arasında tutarlı korelasyonlar kurabilecek, paralel labaratuvar çalışmaları yapılmalıdır.

6.1.2 Bozulma Zarfı:

Dairesel (çapsal) deneylerin sonucunda tamamlanmış olan gerilme-deformasyon eğrilerinin kırılma noktalarından bir zarf çizme prensibine dayanmaktadır(Little ve Richey, 1983). Minimum yorulma ve tekerlek izi deformasyonu düzeylerine denk gelen asfalt üstyapısı dizaynı bu kırılma zarfı penceresinden seçilebilir. Monismith (1965) asfalt betonunun gerilme özelliklerinin üç yöndeki kırılma zarfıyla (basınç gerilmesi, çekme gerilmesi ve ısı) örtüştüğünü ortaya koymuştur. Little ve Richey (1983) yorulma gerilmesini azaltacak asfalt içeriği seçme prosedürü geliştirmişlerdir.

Tatmin edici bir performans alanını tanımlayabilmek için, üstyapı gerilmelerini temsil eden sınır eğrileri bu grafiğin üstüne süperpoze edilebilir. (Şekil 6.2)

1. Maximum rijitliğe sahip asfalt muhtevası için başlangıç optimum asfalt muhtevası seçilir. Bu tahmini tanımlayabilmek için, numunelere %1 asfalt muhtevası arttırmak suretiyle dairesel deneyleri uygulanır. Genellikle %5-6 arası asfalt muhtevası optimum değeri sağlamaktadır. Dairesel test 77⁰F'da dakikada 22.0 in yükleme oranıyla uygulanmaktadır. Ortalama rijitliğe karşı asfalt muhtevası grafiği çizilir. Rijitlik eğrisindeki değer, asfalt muhtevasında %1-2 arasındaki değişime denk gelen zirve değerdir ve bu değer ilerideki testlerde kullanılacaktır.
2. Birinci adımda zirve rijitlik eğrisiyle tanımlanmış asfalt muhtevası daha sonra termal çatlak, sürekli deformasyon ve yorgunluk analizlerine tabi tutulur.
3. Termal çatlaklar ve sürekli deformasyon için sınır eğrileri seçilir. Uygun binder ve soğuma oranı için bir termal-çatlama sınır eğrisi seçilebilir. Soğuma oranı lokal klimatolojik bilgilerden elde edilebilir .sürekli deformasyon sınır eğrisi ise arzu

edilen binder , bölge ikliması ve trafik tipleri için seçilebilir. Sürekli deformasyon üstyapı dizayn abaklarındaki trafik seviyesi eşdeğer dingil yükünü temsil etmektedir.

$$W_{eq}=2*C*W_{tot} \quad (6.2)$$

C: Toplam tekerlek/ tekerlek yolu sayısının, toplam dingil yüküne şeride oranı

W_{tot} == Toplam ticari araç sayısı

İkinci adımda elde edilen kırılma zarflarının arzu edilen termal-çatlama ve sürekli deformasyon sınır eğrileri ile birlikte bir abağa çizilir. İki sınır eğrisi arasındaki bir pencereye denk gelen kırılma zarfı tatmin edici bir karışımı temsil etmektedir.

4 Yorulma dizayn abağı arzu edilen binder, beklenen subgrade modül, üstyapı kalınlığı ve yükleme sayısı için seçilir. Abaklar 3000 ve 18.000 psi. subgrade modülü ve 3 veya 6 inç. kalınlığı için geliştirilmiştir. Abaklar üzerinde belirtilen yükleme sayısı aslında üstyapı ömrü boyunca standart 18kip eşdeğer dingil yüküne denk gelmiştir.

Standart dingil yükü sayısı, tüm araç tipleri için dingil yükü sayısının hasar faktörü çarpımı ile, F, elde edilir. Hasar faktörü şöyle hesaplanır:

$$F=(e_j / e_s)^n \quad (6.3)$$

e_j : j dingilinin üstyapının alt katmanlarında oluşan eğilme gerilmelerini temsil etmektedir.

e_s : standart 18 kip basit dingil yükünün oluşturduğu deformasyon

n : 3 ve 6 arasında bir değer

Yararları:

1. Dairesel testler kolay uygulanabilir olması ve bunun yanında gerekli olan bilgilerin toplanmasının çok kolay olması.
2. Bu metod, stabilite, termal çatlaması ve yorulma ömrü arasında uyum sağlayabilecek bir asfalt muhtevası sağlaması.

Sakıncaları:

1. Bu metod optimum yorulma ömrü için gerekli olan asfalt muhtevasını açıklayamamaktadır. Bu metod önceden seçilmiş asfalt muhtevasına denk gelen yorulma ömrüne, iki sınır eğrisi arasına düşen asfalt muhtevasını kırılma zarfi prensibiyle tespit etmektedir.

Dairesel teste alternatif olarak, doğrudan çekme dayanımı, basınç dayanımı ve sıcaklık, üç boyutlu bir kırılma zarfi oluşturulabilir.

6.1.3 Diğer Sadeleştirmeler

Üstyapı sistemlerinin yorulma performansını tahmin edebilmek amacıyla Nottingham araştırmacıları (Brown, et al, 1982), Shell (Shell,1978) ve Asfalt Enstitüsü (Asfalt Enstitüsü, 1981) sadeleştirilmiş prosedürler geliştirmişlerdir.

Nottingham araştırmacıları eğilme deformasyonu ile, kırılmaya sebep olan yükleme sayısı, asfalt muhtevası ve halka ve bilye yumuşama noktası arasında genel bir ilişki kurmuşlardır.

ϵ_t = Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu

N= Kırılmaya sebep olabilecek yükleme sayısı

$$\log \varepsilon_t = \frac{14.39 \log V_B + 24.2 \log T_{RB} - 40.7 - \log N}{5.13 \log V_B + 8.63 \log T_{RB} - 15.8} \quad (6.4)$$

V_B = Asfalt bağlayıcısının hacmi, yüzde

T_{RB} = Halka ve bilye yumuşama noktası, °C

Shell ise yorulma deformasyonunu aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir:

$$\varepsilon_\tau = (0.856 * V_B + 1.08) \cdot S_{mix}^{-0.36} * N^{-0.2} \quad (6.5)$$

ε_τ = Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu

N = Kırılmaya sebep olabilecek yükleme sayısı

V_B = Asfalt bağlayıcısının hacmi, yüzde

S_{mix} = Belirli yükleme zamanı ve ısıdaki karışımın rijitliği; karışım içindeki agrega ve asfaltın rijitliklerinden ve yüzdelerinden hesaplanabilir.

Asfalt Enstitüsünde şu metodoloji kullanılmıştır:

$$N = 18.4 \cdot C (4.325 * 10^{-3} \cdot (\varepsilon_\tau)^{-3.291} (S_{mix})^{-0.854}) \quad (6.6)$$

ε_τ , N ve S_{mix} yukarıdaki bağıntılarla aynıdır. C terimi ise aşağıdaki denklemden elde edilmiştir.

$$C = 10^M \quad (6.7)$$

$$M = 4.84 \left[\frac{V_B}{V_B + V_V} - 0.69 \right] \quad (6.8)$$

Burada:

V_v = Hava boşluğu hacmi

Bütün bu bağıntılarda asfaltın tüm özellikleri halka ve yumuşama ısıyla veya asfalt rijitliği ile ifade edilmiştir. Bunun yanında bu bağıntıların sadece bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Ve bu yöntemler üstyapı dizaynı amacıyla kullanılmalıdır.

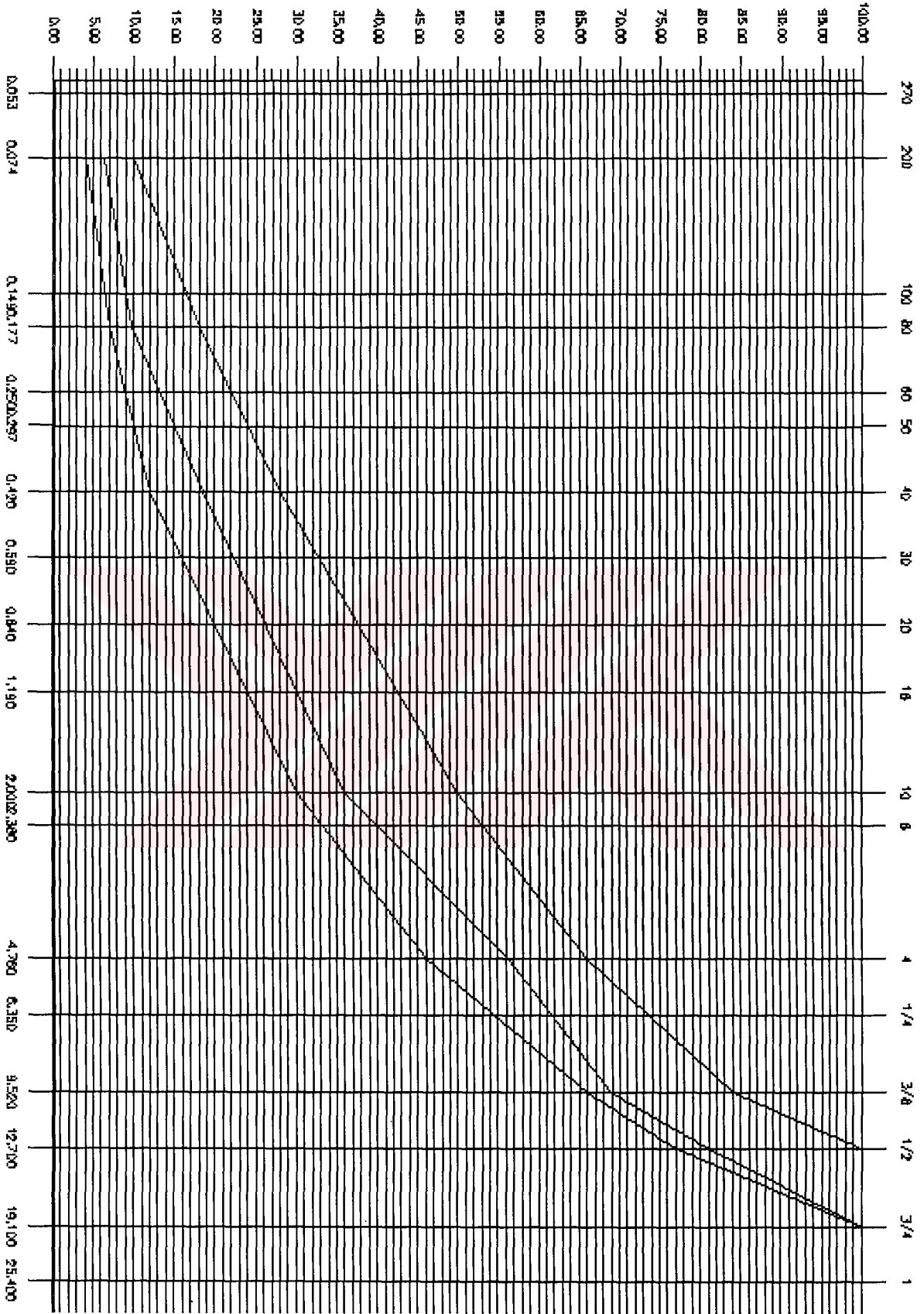
6.2 İstanbul da Üretilen Asfaltın Yorulma Ömrü Tayini

İstanbul Büyükşehir Belediyesi İsfalt Ümraniye asfalt piletinde iki ayrı tipte üretilen asfalt betonu numuneleri üzerine Marshall stabilite deneyi yapılmış hesaplanan karışım değerleri ile Bağlarbaşı Nuhkuyusu, Londra asfaltı sahilyolu bağlantısı ve Kısıklı caddelerinden geçen trafik yükü değerleri veri olarak alınmıştır. Bu değerler Asfalt Enstitüsünün geliştirdiği formüller (Denklemler 6.6, 6.7 ve 6.8) kullanılarak yorulma ömrü hesaplanmıştır. Tablo 6.1 de sayım yapılan trafik kesitleri, saatlik araç sayıları ve yıllık TEF (Taşıt Eşdeğerlilik Faktörü) gösterilmiştir.

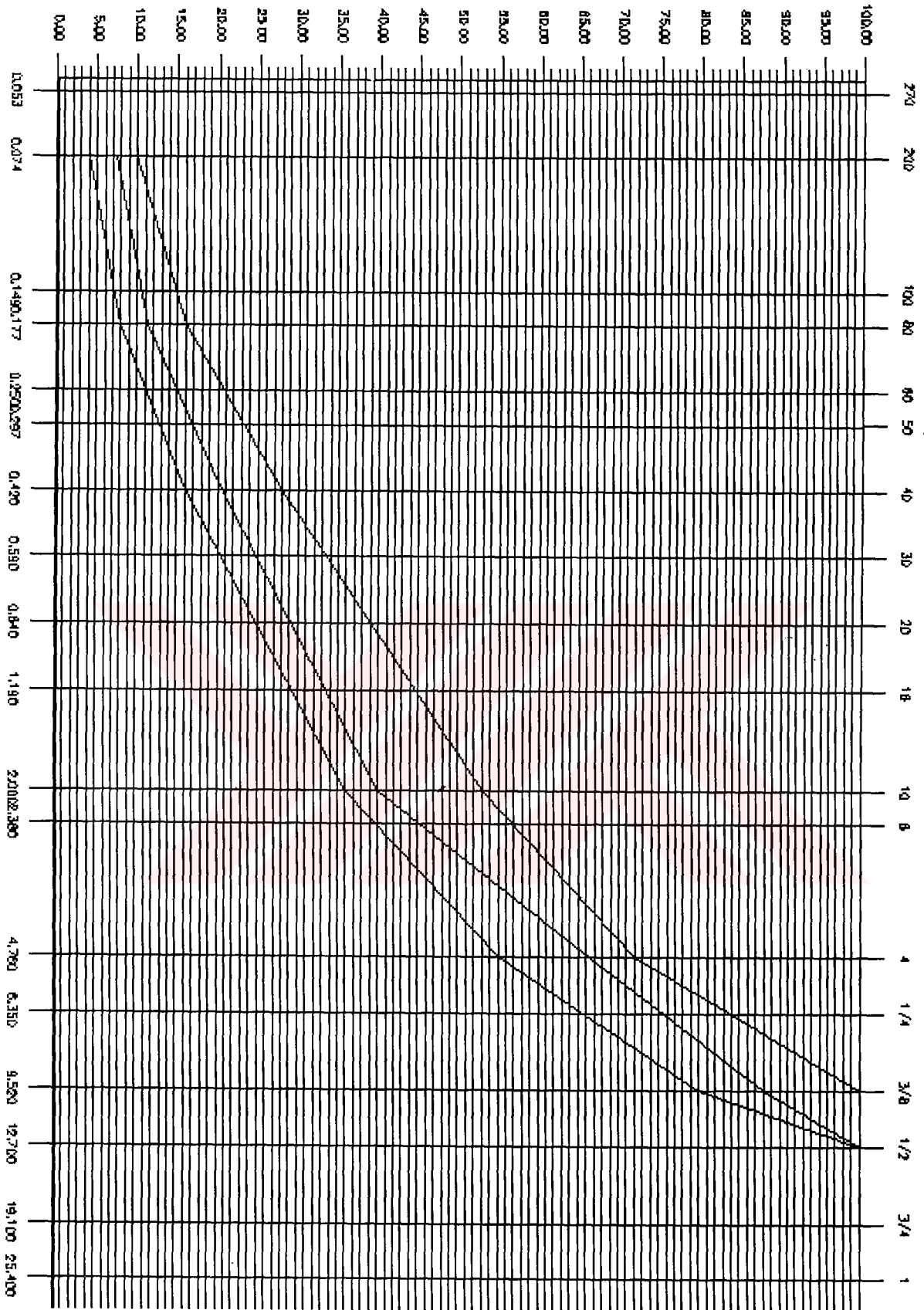
Tablo 6.1 Seçilen kesitlerdeki trafik sayım ve TEF değerleri

Cadde	Otomobil	Otobüs	Midibüs	Minibüs	Kamyonet	Kamyon	Yıllık TEF
Nuhkuyusu	700	140	50	-	50	20	375000
Londra Asfaltı	484	49	44	315	29	10	152000
Kısıklı	318	81	15	136	64	20	265000

Marshall Stabilite deneyi Tip 2 ve Tip 4 olmak üzere iki karışım için yapılmıştır. Tip 2 karışımında kullanılan agrega gradasyonu şekil 6.3 te, Tip 2 karışımında kullanılan agrega gradasyonu ise şekil 6.4 de gösterilmiştir. Marshall Stabilite deneyi sonuçları Tip 2 için tablo 6.2 de, Tip 3 için Tablo 6.3 de belirtilmiştir, ayrıca şekil 6.5 te Tip 2 karışımı Marshall Stabilite deney sonuç grafiği, şekil 6.6 da Tip 4 karışımı Marshall Stabilite deney sonuç grafiği gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Tip 2 karışımında kullanılan agrega gradasyonu grafiği



Şekil 6.4 Tip 4 karışımında kullanılan agrega gradasyonu grafiği

Tablo 6.2 Tip 2 karışımı için Marshall stabilite deney sonuçları

Bazuarı No	BİTÜM		Birliket Yüksekliği			Havadaki Ağırlık (gr)	Sudağı Ağırlık (gr)	Doy. Yüz K. Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	Hac. Özg. Ağırlık (g/cm ³)	Max Teo. Öz. Ağırlık DT	Boşluk % VA	VMA %	Aer. Dolu Boşluk % VF	Acma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltme Faktörü	Düzelt. Stabilite (kg)	FORMÜLLER
	% Wa	% Wb	1	2	3														
	4,50	4,31	49,5			61,1	1145,3	660,9	0	660,9	2,364				1,62	1000	1,064	1008,00	$V = B - C$
						61,6	1147,1	661,7	0	661,7	2,363				2,81	890	1,050	1009,00	$V = \frac{A}{V}$
						61,3	1147,1	661,9	0	661,8	2,364				2,05	970	1,059	878,00	$D_p = \frac{A}{V}$
ORTALAMALAR						60,8	1154,8	669	0	485,8	2,377	2,510	5,83	14,57	2,16			1009,00	$D_p = \frac{A}{V}$
5,00		4,76	55			60,8	1152,7	670,7	0	482,0	2,391				2,30	1030	1,073	1105,19	$D_p = \frac{A}{V}$
						60,2	1151,0	670,5	0	480,5	2,395				3,43	990	1,085	1074,15	$D_p = \frac{A}{V}$
ORTALAMALAR						60,2	1151,0	670,5	0	480,5	2,395	2,496	4,21	14,00	3,06	1070	1,090	1166,30	$D_p = \frac{A}{V}$
											2,391				2,93			1115,00	$D_p = \frac{A}{V}$
5,50		5,21	60,5			61,2	1157	674,8	0	482,2	2,399				3,30	1080	1,062	1147,00	$D_p = \frac{A}{V}$
						60,8	1152,6	673	0	479,6	2,403				4,32	1050	1,073	1127,00	$D_p = \frac{A}{V}$
						60,8	1159,3	677,8	0	481,5	2,408				3,81	1000	1,076	1076,00	$D_p = \frac{A}{V}$
ORTALAMALAR						60,3	1156	674,4	0,0	481,6	2,403	2,476	3,07	13,98	3,81			1117,00	$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$
6,00		5,66	66			60,6	1160,5	678,4	0,0	482,1	2,407				4,35	990	1,088	1077,12	$G_{sb} = \frac{K\% + \frac{f\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
						60,4	1156,8	676,2	0	480,6	2,407				4,32	940	1,085	1019,90	$G_{sb} = \frac{K\% + \frac{f\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR						60,5	1159,7	678,5	0	481,2	2,410	2,462	2,32	14,32	4,41			1037,00	$G_{sb} = \frac{K\% + \frac{f\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
6,50		6,10	70,5			60,8	1161,1	677	0	484,1	2,398				4,57	930	1,079	1003,47	$G_{sb} = \frac{K\% + \frac{f\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
						60,6	1163,4	680,2	0	483,2	2,408				4,78	850	1,079	917,15	$G_{sb} = \frac{K\% + \frac{f\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR						60,6	1156	673,9	0	482,1	2,398	2,446	1,68	14,72	4,78			992,00	$VMA = 100 - \frac{G_{sb}}{G_m}$
7,00		6,54	77			61,4	1164,4	677,1	0	487,3	2,389				5,33	870	1,079	938,73	$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_{sb}$
						60,7	1161,3	676,8	0	484,5	2,397	2,430	1,44	15,47	5,08	890	1,076	957,64	$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_{sb}$
ORTALAMALAR											2,395				5,12			914,00	$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_{sb}$

Bitüm Özgül Ağırlığı (Cb) = 1,024

Kaba Agrega %si (K%) = 43,7

Kaba Agr. Hac. öz. ağı. (Ck) = 2,678

Akma = 3,83mm

Bitüm Penetrasyonu = 80,0

İnce Agrega %si (F%) = 50,0

İnce Agr. hac. öz. ağı. (Cf) = 2,616

Smix=5 Mpa

Agreganın Bitüm Abs. = 5,9

Filler %si (F%) = 5,9

Filler zahiri öz. ağı. (Cfd) = 2,694

Et=0,002

Agr. Kar. efektif öz. ağı. (Cef) = 2,689

Agrega Kar. hac. öz. ağı. (Csb) = 2,648

Birliketeki Agrega Miktarı = 1100

Optimum Bitüm %si = %5,56

Stabilite (Optimum bitimde) = 1170 kg

Boşluk %si = %3,05

Tablo 6.3 Tip 4 karışımı için Marshall stabilite deney sonuçları

BİRİMLERİ	BİTÜM			Biriket Yüksekliği			Havadaki		Doy. Yüz K. ağırl. (gr)	Hacim (mm ³)	Hac. Örg. Ağırlık	Max. Teo. Öz. Ağırlık DT	Boşluk % V _H	VMA %	Aer. Delü Boşluk % V _F	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltme Faktörü	Düzelt. Stabilite (kg)	FORMÜLLER
	%	W _b	W _p	1	2	3	Ort.	Ağırl. (gr)												
	4,50	4,31	49,5				62,8	1144,2	649,6	0	494,6	2,313				2,16	990	1,018	1008,00	$V = B - C$
							61,9	1143,3	653,2	0	490,1	2,333				2,52	970	1,040	1009,00	$D_p = \frac{A}{V}$
							62,2	1147	654	0	493,0	2,327				2,03	850	1,033	878,00	$D_p = \frac{A}{V}$
ORTALAMALAR							61,6	1153,2	660,3	0	492,9	2,324	2,510	15,83	53,19	2,24	1000	1,036	965,00	$D_T = \frac{(100 + W_a)}{W_a}$
	5,00	4,76	55				62,1	1153,1	663,6	0	489,5	2,356				3,25	1030	1,062	1093,86	$D_T = \frac{100}{W_a}$
							61,2	0,0	0	0	0,0					0,00	0		0,00	$D_T = \frac{100}{W_a}$
ORTALAMALAR							61,7	1155	666,6	0	488,4	2,365	2,493	15,36	62,17	3,11	1080	1,047	1064,93	$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$
	5,50	5,21	60,5				61,4	1155,4	665,8	0	489,6	2,360				3,52	1050	1,056	1109,00	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
							61,9	1159,4	669,6	0	489,8	2,367	2,476	15,18	70,22	3,28	1010	1,040	1050,00	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR							60,9	1162,2	675,4	0,0	486,8	2,387	2,459	14,91	79,27	3,45	1000	1,070	1070,00	$MMA = 100 - \frac{G_{fb}}{G_{fb}}$
	6,00	5,66	66				61,5	1163,9	674,5	0,0	484,4	2,378				3,22	980	1,053	1031,94	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
							61,2	1164,1	677,3	0	486,8	2,391	2,459	14,91	79,27	3,45	950	1,062	1008,90	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR							61,0	1166,4	679,5	0	486,9	2,396	2,459	14,91	79,27	3,45	1000	1,070	1070,00	$MMA = 100 - \frac{G_{fb}}{G_{fb}}$
	6,50	6,10	70,5				61,3	1165,3	677,6	0	487,7	2,389				4,02	940	1,067	1002,98	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
							60,9	1161,7	676,1	0	485,6	2,392	2,443	14,98	86,05	4,01	850	1,070	909,50	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR							61,3	1168,5	679,6	0	488,9	2,390	2,443	14,98	86,05	4,01	900	1,059	953,10	$MMA = 100 - \frac{G_{fb}}{G_{fb}}$
	7,00	6,54	77				60,1	1140,5	662,6	0	477,9	2,386				4,21	820	1,094	897,08	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
							61,3	1168,2	678,9	0	489,3	2,387	2,427	15,52	89,65	4,39	820	1,059	868,38	$G_{fb} = \frac{K\% + \frac{1\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}}{100}$
ORTALAMALAR							61,3	1168,2	678,9	0	489,3	2,387	2,427	15,52	89,65	4,39	820	1,059	868,38	$MMA = 100 - \frac{G_{fb}}{G_{fb}}$
																				$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{fb})}{(G_{ef} * G_{fb})} * G_{fb}$
																				$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{fb})}{(G_{ef} * G_{fb})} * G_{fb}$

Bitüm Özgünlüğü (G_B) = 1,024

Kaba Agregat %'si (K%) = 33,7

Kaba Agr. Hac. Öz. ağı. (G_k) = 2,678

Akma = 3,41mm

Bitüm Penetrasyonu = 80,0

İnce Agregat %'si (I%) = 58,9

İnce Agr. hac. öz. ağı. (G_i) = 2,616

Smix-6 Mpa

Agreganın Bitüm Abs. = 6,2

Filler %'si (F%) = 7,4

Filler zahiri öz. ağı. (G_f) = 2,694

Et=0,002

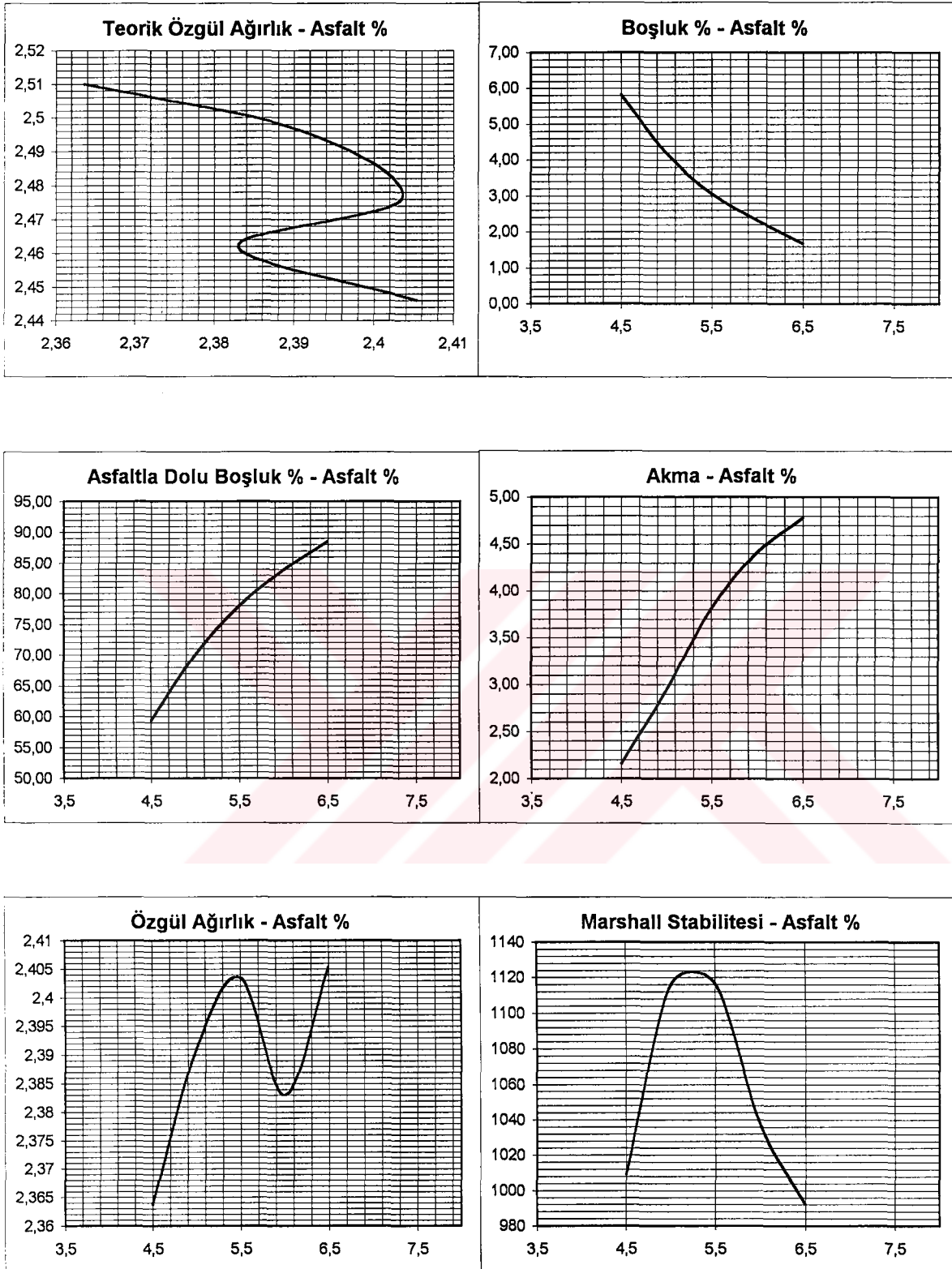
Agr. Kar. efektif öz. ağı. (C_{ef}) = 2,685Agregat Kar. hac. öz. ağı. (C_h) = 2,642

Biriketeki Agregat Miktarı = 1100

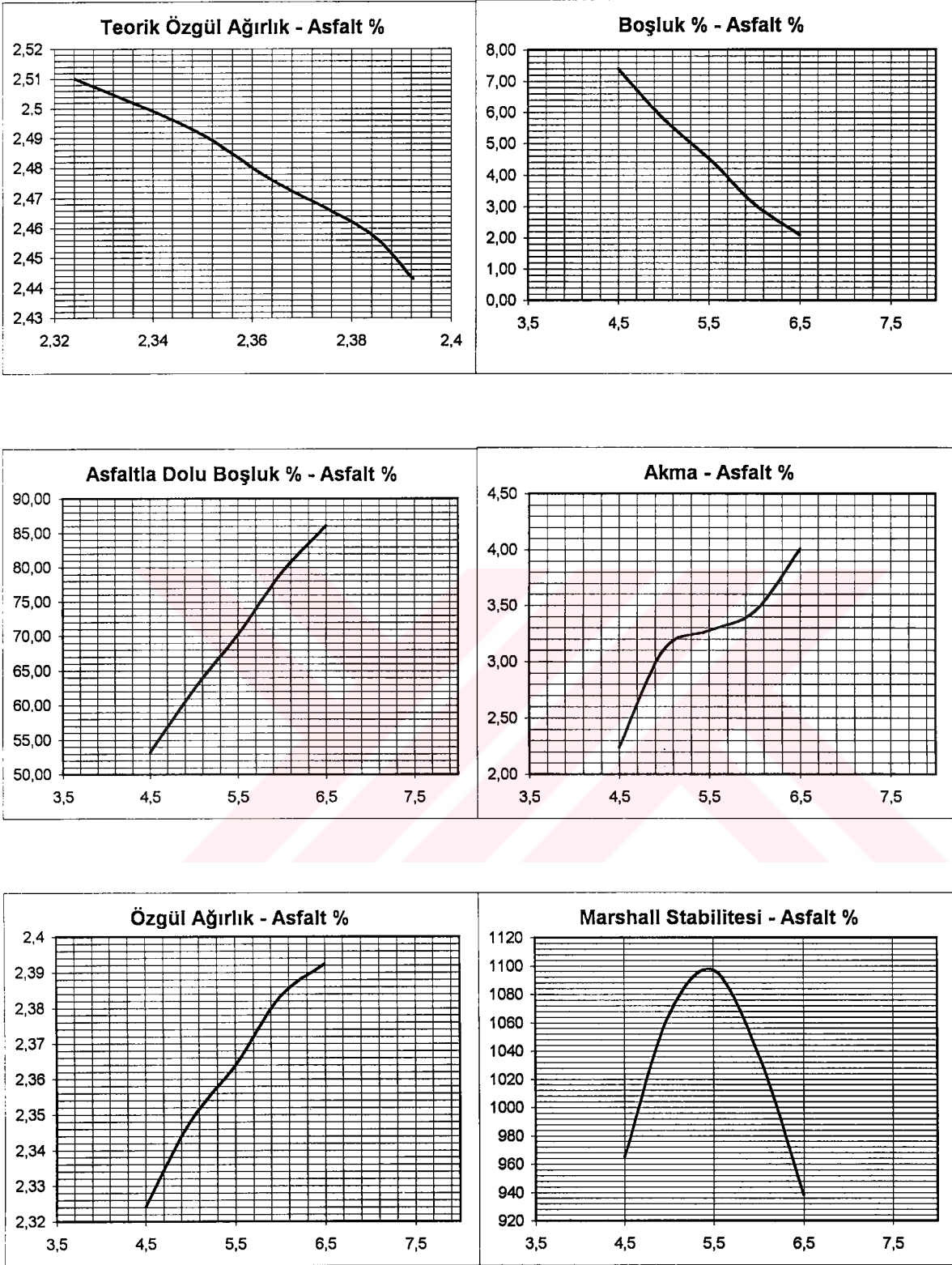
Optimum Bitüm %'si = %5,84

Stabilite (Optimum bitimde) = 1075 kg

Boşluk %'si = %3,20



Şekil 6.5 Tip 2 karışımı için Marshall stabilite deneyi sonuç grafikleri



Şekil 6.6 Tip 4 karışımı için Marshall stabilite deneyi sonuç grafikleri

Marshall stabilite deneyinden elde edilen sonuç değerleri Asfalt Enstitüsü' nün geliştirdiği formüller (Denklemler 6.6, 6.7, 6.8) kullanılarak, belirtilen trafik kesitlerinde her iki tipte üretilen asfalt betonu için yorulma ömürleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo 6.4 de gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Seçilen trafik kesitlerinde elde edilen asfalt betonu kaplamalı üstyapıların yorulma ömrü

Cadde	Yorulma Ömrü (yıl)	
	Tip 2	Tip4
Nuhkuyusu	25	21
Londra Asfaltı	61	53
Kısıklı	35	30

Sonuçlardan anlaşılacağı üzere, gerçekte, İstanbul'da üretilen asfaltın uzun bir yorulma ömrüne sahip olduğunu söyleyebiliriz. İstanbul şehiriçi ana arterlerdeki asfalt bozuklukları ile bu sonucun örtüşür görünmemesinin sebebi ise: Aslında bozulmanın asfalt kaplamalı üstyapının yorulmasından kaynaklanmadığı, mevcut yollarımızın altyapısının yeterli düzeyde olmayışından, drenaj sorunlarından ve asfaltın serilme işleminde optimum sıcaklığa dikkat edilmemesinden kaynaklanmıştır. İşte bu sebeple teorik asfalt betonu kaplamalı üstyapılar ile gerçek trafik yüküne maruz asfalt betonu kaplamalı üstyapıların ömürleri farklılık göstermektedir. Kısacası İstanbul'da anaarterlerde görülen asfalt betonu kaplaması çatlakları yorulmaya bağlı bir bozulma değil, yukarıda bahsettiğimiz sebeplerden ötürü oluşan bozulmalardır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar üç bölümde ele alınmıştır:

1. Numunenin imalatı
2. Asfalt kaplamalı üstyapılarda yorulma davranışını etkileyen faktörler.
3. Test metotlarının değerlendirilmesi

7.1 Numunenin İmalatı

Laboratuar çalışmaları için hazırlanmış numunelerin sıkıştırılma metodunun yorulma karakteristiklerine olan etkisini ortaya koymak çok önemlidir. Buna bağlı olarak en çok kabul gören üç sıkıştırma yöntemi (yoğurmalı sıkıştırma, dönerek sıkıştırma, trafik altında sıkıştırma) kullanılarak bir yorulma test programı geliştirilmelidir.

7.2 Yorulma Davranışını Etkileyen Faktörler

1. Gerilme kontrollü yükleme tipi kalın asfalt tabakalarının yorulma davranışını daha iyi temsil ederken deformasyon kontrollü yükleme tipi ise ince tabakalar için daha uygun olmaktadır. Aynı karışım için deformasyon kontrollü test için daha büyük yorulma ömrü sonucu elde edilmiştir.
2. Boşluk oranı yorulma ömrünü etkileyen önemli bir faktör olmakla beraber % 3'ten küçük olmamak kaydıyla olabildiğince küçük bir değer olmalı.
3. Asfalt muhtevası ise mühendis tarafından kontrol edilebilen ve yorulma davranışı üzerinde önemli etkisi olan bir faktördür. Maksimum yorulma ömrü elde etmek için gerekli olan asfalt muhtevası tekerlek izi bozulması için gerekli olandan daha

fazladır. Bunun yanında stabilite göz önünde bulundurulması kaydıyla asfalt muhtevası olabildiğince yüksek olmalı

4. Asfalt kalın tabakalar için biraz rijit, ince olanlar içinde fleksibil olmalı. Orta kalınlık için 100 penetrasyonlu asfalt yeterli olmaktadır.
5. Kalın asfalt tabakaları için yoğun gradasyonlu agregalar önerilirken açık gradasyonlu agregalar ise ince tabakalar için önerilmektedir
6. Yüksek ısılar kalın asfalt tabakalarında yorulma ömrünü azaltırken, ince tabakalarda arttırmaktadır.

7.3 Deney Metotları

Test metotlarını değerlendirme önceden bahsedilmiştir. Burada şunu not etmek gerekir ki tekrarlı eğilme testi en iyi sonuçları vermektedir. Doğrudan gerilme testleri de bu kategoride ele almak gerekir ki yorulma davranışını açıklamakta kullanılabilir. Kolaylığı sebebiyle dairesel yükleme tipide yüksek bir kullanıma sahiptir.

KAYNAKLAR

American Society for Testing Materials, (1983), "Preparation of Bituminous Mixture Beam Specimens by Means of the California Kneading Compactor", ASTM-D3202-83, Philadelphia.

The Asphalt Institute, (1981), "Thickness Design Manual (MS-1)", 9'th edition, College Park, Maryland.

Bonnot, J., (1986), "Asphalt Aggregate Mixtures", Transportation Research Record 1096, Transportation Research Board, Washington, D.C., 42-50.

Deacon, J.A., (1965), "Fatigue of Asphalt Concrete", Graduate Report, The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.

Epps, J.A., and Monismith, C.L, (1972), "Fatigue of Asphalt Concrete Mixtures-Summary of Existing Information", in STP508, ASTM, 19-45.

Epps, J.A., (1969), "Influence of Mixture Variables on The Flexural Fatigue and Tensile Properties of Asphalt Concrete", Doctor of Engineering Thesis, University of California, Berkeley.

Jimenez, R.A, and Gallaway, B.M., (1962), "Behaviour of Asphaltic Concrete Diaphragms to Repetitive Loadings.", International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 339.

Majidzadeh, K., Kauffmann, E.M., and Ramsamooj, D.V (1971), "Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue.", Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 227-246.

Monismith, C.L., (1981), "Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design.", Proceedings, 18'th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque.

Monismith, C.L., (1966), "Asphalt Mixture Behaviour in Repeated Flexure", Report No. TE 66-66, ITTE, to California Division of Highways, University of California.

Monismith, C.L., and Deacon, J.A., (1969), "Fatigue of Asphalt Paving Mixtures," ASCE Transportation Engineering Journal, Vol. 95:2,317-346

Monismith, C.L., Epps, J.A., and Finn, F.N (1985), "Improved Asphalt Mix Design," Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists.

Monismith, C.L., Epps, J.A., Kasianchuk, and McLean, D.B (1971), "Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure.", Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, 303.

Pell, P.S. (1967), "Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes," Proceedings, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, University of Michigan, 310.

Pell, P.S. (1965), "Fatigue of Bituminous Materials in Flexible Pavements", Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 31.

Pell, P.S. (1973), "Characterization of Fatigue Behaviour", in Structural Design of Asphalt Concrete Pavements to Prevent Fatigue Cracking, Special Report 140, Highway Research Board, 49-64.

Raithby, K.D. and Ramshaw, J.T (1972), Effect of Secondary Compaction on the Fatigue Performance of a Hot-Rolled Asphalt, TRRL-LR 471, Crowthorne, England.

Said, S.F. (1988), "Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures", VT1 meddelande 583A, Vag-öch Traffic Institutet (Swedish).

Salam, Y.M., (1971), "Characteristics of Deformation and Fracture of Asphalt Concrete", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

Shell International Petroleum Company, Ltd. (1978), Shell Design Manual, London.

Van Dijk, W., (1975), "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes", Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 38.

Witczak, M.W., (1976), "Pavement Performance Models; Repeated Load Fracture of Pavement Systems", Vol. 1, Report No. FAA-RD-75-2771. U.S Army Engineer Waterways Experiment Station.

Yüce, Rüştü, (1972), "The Influence of Some Dimensional Factors and of Elastic Foundation Support on Fatigue of Asphalt Concrete", Doktora tezi.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	26.06.1973	
Doğum yeri	Trabzon	
Lise	1984-1991	Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans	1991-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ulaştırma Programı
Çalıştığı Kurum	1997-Devam ediyor	İ.B.B. Şehir Planlama Müdürlüğü

