

85069

**BİTÜMLÜ KARIŞIM DEĞİŞKENLERİNİN
PERFORMANS
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI
ve
HİZMET ÖMRÜ TAHMİNİ
İÇİN BİR MODEL KURULMASI**

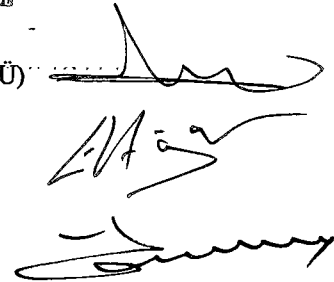
İnş. Y. Müh. Halit ÖZEN

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

DOKTORA TEZİ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Savunma Tarihi : 03/12/1999
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa ILICALI (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emine AĞAR (İTÜ)
Doç. Dr. Güven ÖZTAŞ (İTÜ)

85069


İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xvii
1. BAĞLAYICI TİP VE KARIŞIM DEĞİŞKENLERİ.....	1
1.1 Bitüm	1
1.2 Katkı Maddeleri	5
1.3 Karışım Değişkenleri	7
2. YORULMA KAVRAMININ TANIMI	9
2.1 Bir Mukavemet Problemi Olarak Yorulma	9
2.2 Asfalt Karışımlarında Yorulma	11
3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN YORULMA DİRENİMİ DENEY YÖNTEMLERİ ve DENEY DEĞİŞKENLERİNİN YORULMA DİRENİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ.....	13
3.1 Yükleme Modu	13
3.2 Yük ve Çevre Değişkenleri	15
3.3 Deney Yöntemleri ve Gelişimi	18
3.3.1 Basit Eğilme Deneyi	24
3.3.1.1 Orta ve Üç Nokta Yükleme Deneyi	24
3.3.1.2 Konsol Yükleme Deneyi	26
3.3.2 Mesnetli Eğilme	30
3.3.3 Doğrudan Eksenel Yükleme Deneyi	30
3.3.3.1 Çekme	30
3.3.3.2 Çekme/Basınç.....	32
3.3.4 Dairesel Deney	32
3.3.5 Üç Eksenli Deney.....	35
3.3.6 Dinamik Sünme Deneyi	39
3.3.7 Tekerlek İzi Oluşumu Deneyleri	40
3.3.7.1 Laboratuar Tekerlek İzi Deneyi	40
3.3.7.2 Gerçek Boyutlu Deneyler.....	41
3.3.8 Deney Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	44

4.	NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ VE KARIŞIM DEĞİŞKENLERİNİN YORULMA DİRENİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNE YÖNELİK LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	48
4.1	Numune Hazırlama ve Sıkıştırma Yönteminin Yorulma Direnimine Etkisi	48
4.1.1	Statik Sıkıştırma	49
4.1.2	Darbeli Sıkıştırma	50
4.1.3	Yoğurmalı Sıkıştırma	50
4.1.4	Dönel Sıkıştırma.....	52
4.1.5	Tekerlek Altında Sıkıştırma	53
4.1.6	Numune Hazırlama Metotlarının Değerlendirilmesi	53
4.2	Karışım Değişkenlerinin Yorulma Direnimi Üzerine Etkisi	55
5.	BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	61
5.1	Yorulma Dayanımı Modelleri	62
5.2	Tekerlek İzi Oluşumu Modelleri	65
5.3	Karışım Performansının Değerlendirilmesinde Uygulanan Bazı Deneyler	67
5.3.1	Bitümlü Karışımların Dolaylı Çekme Mukavemeti.....	67
5.3.2	Bitümlü Karışımların Elastisite Modülü için Dolaylı Çekme Deneyi	70
5.3.3	Bitümlü Karışımların Sünme Modülü Deneyi	74
6.	ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN DENEYLER	79
6.1	Giriş	79
6.2	Çalışmada Kullanılan Malzemeler	79
6.2.1	Agrega	79
6.2.2	Bağlayıcı	81
6.2.3	Katkı Malzemesi	81
6.3	Uygulanan Deneyler ve Sonuçları	83
6.3.1	Giriş	83
6.3.2	Marshall Stabilité Deneyi	84
6.3.3	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi	91
6.3.4	Dolaylı Çekme Deneyi	94
6.3.4.1	Karışım Değişkenlerinin Elastisite Modülü Üzerine Etkisi	96
6.3.4.2	Yükleme Periyodu ve Hızının Elastisite Modülü Üzerine Etkisi	107
6.3.5	Statik Sünme Deneyi	110
6.3.6	Tekrarlı Sünme Deneyi	115
6.4	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	118
6.4.1	Karışım Elastisite Modüllerine Ait Değerlendirme.....	118
6.4.2	Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyeline Ait Değerlendirme.....	118
7.	TEKERLEK İZİ OLUŞUMU MODELİNİN KURULMASI VE KARIŞIM PERFORMANSLARINI DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ.....	123
7.1	Tekerlek izi Oluşumu Modelinin Kurulması.....	123

7.2	Seçilen Yorulma Modellerinden lkemiz Koşullarına Uyan Modelin Tespiti.....	128
7.3	Karışım Performanslarının Değerlendirme Yöntemi.....	129
7.3.1	Karışım Stabilitelerine Ait Değerlendirme.....	129
7.3.2	Karışımın Esneklik ve Yorulma Dayanımı Bakımından Değerlendirilmesi.....	130
7.3.3	Karışımın Tekerlek İzi Derinliğine Ait Değerlendirme.....	133
7.4	Genel Değerlendirme.....	136
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	138
KAYNAKLAR		141
EKLER		144
ÖZGEÇMİŞ		181



SİMGE LİSTESİ

σ	: Gerilme
σ_r	: Çekme Gerilmesi
σ_z	: Basınç Gerilmesi
MD	: Mod faktörü
2a	: Dairesel yayılı yük çapı
P	: Uygulanan yük
h	: Yükseklik
2α	: yük çubuğunun genişliği ile orijinin birleştiği nokta arasındaki açı
a	: Yük çubuğunun genişliği
N_f	: Yorulma ömrü
ϵ	: Deformasyon
S_{mix}	: Karışımın Esneklik Modülü
T_{RB}	: Yumuşamam Noktası
V	: Hacimce Boşluk (%)
V_b	: Hacimce Bitüm Yüzdesi (%)
VFA	: Asfaltla Dolu Boşluk (%)
VMA	: Mineral Agrega İçerisindeki Boşluk (%)
P_B	: Ağırlıkca Bitüm Oranı (%)
E	: Elastisite Modülü
RR	: Tekerlek İzi Oranı
m_c	: Statik Sünme Eğrisinin doğru olduğu kesimdeki eğim
X	: Geri dönme kabiliyeti
ν	: Poisson oranı
optAC	: Katkısız karışım için optimum bitüm miktarı (%)
optACv	: Katkılı karışım için optimum bitüm miktarı (%)
S_t	: Dolaylı Çekme Mukavemeti
YPE	: Yükleme Periyodu Etkisi
YHE	: Yükleme Hızı Etkisi

CM : Sünme Modülü
 ϵ_t : Kalıcı Deformasyon
 ϵ_p : Geri Döner Deformasyon
AC : Asfalt Çimentosu
EVA : Etil-vinil-asetat
PVC : Polivinil klorid



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Yol Malzemesi Olarak Bitüm Çeşitleri	2
Şekil 2.1 Gerilme Durumları	10
Şekil 2.2 Karayolu Üstyapısı Kesiti	11
Şekil 3.1 Laboratuarda Uygulanan Genel Yük Şekilleri	16
Şekil 3.2 Yüklü sürenin üstyapı derinliği ile hıza bağlı olarak dağılımı	17
Şekil 3.3 Üç Noktalı Eğilme Deney Aparatı	25
Şekil 3.4 Orta Nokta Eğilme Aparatı (vanDijk, 1972)	27
Şekil 3.5 Eğilme Aparatı (Pell)	28
Şekil 3.6 Deformasyon Kontrollü Burkulma Makinesi	29
Şekil 3.7 Bükme Yorulması Deney Makinesi	29
Şekil 3.8 Yorulma Deney Makinesi	31
Şekil 3.9 Doğrudan Eksenel Yorulma Deneyinin Şematik Temsili	33
Şekil 3.10 Dairesel Yükleme Deneyi Konfigürasyonu ve Kırılma	36
Şekil 3.11 Dairesel Yükleme Deneyi Gerilme Dağılımı	36
Şekil 3.12 Üç Eksenli Yorulma Yükleme Deney Aleti	37
Şekil 3.13 Üç Eksenli Eksenel ve Radyal Yük Kontrollü Deney Alet	38
Şekil 3.14 Dinamik Sünme Deneyi	39
Şekil 3.15 Yükün Uygulama Şekli	39
Şekil 3.16 Tekerlek İzi Deneyi	40
Şekil 3.17 Gerçek Boyutlu Deney (Dairesel)	43
Şekil 3.18 Gerçek Boyutlu Deney (Boyuna)	43
Şekil 4.1 Sıkıştırma Metodunun İzafi Karışım Stabilesine Oranı	51
Şekil 4.2 Dönerek sıkıştırma çalışma prensibi	52
Şekil 4.3 Farklı Sıkıştırma Ekipmanları ile sıkıştırılan numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Değerlerinin Karşılaştırılması (AAMAS, 1992) ..	54
Şekil 4.4 Farklı Sıkıştırma Ekipmanları ile sıkıştırılan numunelerin Esneklik Modülü Değerlerinin Karşılaştırılması (AAMAS, 1992)	54
Şekil 4.5 Dolaylı Çekme Deneyin de Esneklik Modülünün Boşluk Yüzdesi ile Değişimi	56

Şekil 4.6	Asfalt muhtevasına bağlı olarak karışımların stabilite ve durabilite ilişkisi (C. L. Monismith, vd., 1989)	58
Şekil 4.7	Sıcaklık Elastisite Modülü ilişkisi (S. F. Safwat, 1996)	59
Şekil 4.8	Sıcaklık Elastisite Modülü İlişkisi (S. J. Biczysko, 1990)	60
Şekil 5.1	Dolaylı Çekme Deneyi	71
Şekil 5.2	Yükün uygulanma ve deformasyon şekli	72
Şekil 5.3	Tek Eksenli Basınç	75
Şekil 6.1	Agrega Gradasyonu	80
Şekil 6.2	% 7 Vestoplast Katkılı Karışım ve Geleneksel Karışımın Mukavemetlerinin Karşılaştırılması	82
Şekil 6.3	Karışım Deneyleri Akış Şeması ve Numune Sayıları	83
Şekil 6.4	Marshall Stabilitesi-Bitüm Muhtevası İlişkisi	85
Şekil 6.5	Özgül Ağırlık-Bitüm Muhtevası İlişkisi	86
Şekil 6.6	Boşluk(%)-Bitüm Muhtevası İlişkisi	86
Şekil 6.7	Asfaltla Dolu Boşluk (%) -Bitüm Muhtevası İlişkisi	87
Şekil 6.8	Akma-Bitüm Muhtevası İlişkisi	88
Şekil 6.9	Marshall Stabilitesi-Bitüm Muhtevası İlişkisi	88
Şekil 6.10	Özgül Ağırlık-Bitüm Muhtevası İlişkisi	89
Şekil 6.11	Boşluk(%)-Bitüm Muhtevası İlişkisi	89
Şekil 6.12	Asfaltla Dolu Boşluk (%) -Bitüm Muhtevası İlişkisi	90
Şekil 6.13	Akma-Bitüm Muhtevası İlişkisi	91
Şekil 6.14	Dolaylı Çekme Mukavemeti-Bitüm Muhtevası İlişkisi	93
Şekil 6.15	Düşey Deformasyon-Bitüm Muhtevası İlişkisi	93
Şekil 6.16	Deney Uygulama Sıralaması ve Deney Numunelerinin Kodlama Sistemi	95
Şekil 6.17	Bitüm Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)	97
Şekil 6.18	Bitüm Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)	98
Şekil 6.19	Bitüm Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)	99
Şekil 6.20	Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)	101
Şekil 6.21	Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)	102
Şekil 6.22	Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)	103

Şekil 6.23	Asfalt la Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)	104
Şekil 6.24	Asfaltla Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)	105
Şekil 6.25	Asfaltla Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)	106
Şekil 6.26	Yükleme Periyodunun Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi	108
Şekil 6.27	Yükleme Hızının Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi	109
Şekil 6.28	Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (5 °C Sıcaklık)	111
Şekil 6.29	Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (15 °C Sıcaklık)	112
Şekil 6.30	Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (25 °C Sıcaklık)	113
Şekil 6.31	Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (40 °C Sıcaklık)	114
Şekil 6.32	Tekrarlı Yük ve Uygulama Süresi	115
Şekil 6.33	Yük Tekerrür Sayısı Kalıcı Deformasyon İlişkisi	116
Şekil 6.34	Boşluk-Kalıcı Deformasyon İlişkisi	117
Şekil 6.35	Asfaltla Dolu Boşluk-Kalıcı Deformasyon İlişkisi	117
Şekil 6.36	Bitüm Oranlarına Göre Elastisite Modülü Değerlerinin Uygunluğu.....	119
Şekil 6.37	Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (5 °C).....	120
Şekil 6.38	Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (15 °C)	120
Şekil 6.39	Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (25 °C)	121
Şekil 6.40	Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (40 °C)	121
Şekil 7.1	Model ve Gerçek A Değerleri Arasındaki İlişki	126
Şekil 7.2	Model ve Gerçek B Değerleri Arasındaki İlişki.....	127
Şekil 7.3	Stabilite Değerleri Arası Farklılık.....	130
Şekil 7.4	Katkılı ve Katkısız Karışımların Elastisite Modülü Değerlerinin Uygunluğu.....	131

Şekil 7.5	Seçilen Üstyapı Kesiti.....	132
Şekil 7.6	Yorulma Ömürleri arası Farklılık.....	133
Şekil 7.7	Katkılı ve Katkısız Karışımların Tekerlek İzi Oluşumu Riski (5 °C).....	134
Şekil 7.8	Katkılı ve Katkısız Karışımların Tekerlek İzi Oluşumu Riski (15 °C).....	134
Şekil 7.9	Katkılı ve Katkısız Karışımların Tekerlek İzi Oluşumu Riski (25 °C).....	135
Şekil 7.10	Katkılı ve Katkısız Karışımların Tekerlek İzi Oluşumu Riski (40 °C).....	135



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırması	7
Çizelge 1.2 Karışım Malzeme ve Değişkenleri	8
Çizelge 3.1 Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Yükleme Durumlarının Karşılaştırılması (Monismith, vd., 1990)	14
Çizelge 3.2 Yükleme Modu ve Karışım Değişkenlerinin Yorulma ve Rijitlik Üzerine Olan etkisi (Monosimith, vd., 1990)	15
Çizelge 3.3 Dalga şeklinin yorulma direnimi üzerine olan etkisi (Monosimith, vd., 1990)	17
Çizelge 3.4 Yorulma Deney karakteristikleri	20
Çizelge 3.5 Yorulma deney metot ve değerlendirmelerinin kronolojisi	21
Çizelge 3.6 Gerçek Boyutlu Deney Alanları (NCHRP Synthesis 235)	41
Çizelge 3.7 Deney metotlarının değerlendirilmesi (J. Matthews, C. L. Monismith ve J. Craus, 1993)	46
Çizelge 4.1 Karışım Özellikleri (C. L. Monismith, vd., 1989)	57
Çizelge 6.1 Agrega Gradasyonu	80
Çizelge 6.2 Kaba ve İnce Agrega Özgül Ağırlıkları	81
Çizelge 6.3 Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri	81
Çizelge 6.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti	92
Çizelge 6.5 Yükleme Periyodu ve Yükleme Hızı	94
Çizelge 6.6 Bitüm Muhtevasının Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi	96
Çizelge 6.7 Yükleme Periyodu Etkisi (YPE)	107
Çizelge 6.8 Yükleme Hızı Etkisi (YHE)	109
Çizelge 6.9 Karışım Değişkenleri ve 20. Saat Sonunda Oluşan Kalıcı Deformasyon	116
Çizelge 7.1 Yük Tekerrür Sayısı-Kalıcı Deformasyon Regresyon Analizi Sonuçları.	124
Çizelge 7.2 Model Çalışmasında Kullanılan Bağımsız Değişkenler.....	124
Çizelge 7.3 Korelasyon Matrisi.....	125
Çizelge 7.4 Regresyon ve Gerçek Yorulma Denklemleri.....	127

Çizelge 7.5	K ve n Regresyon Katsayıları.....	129
Çizelge 7.6	Katkılı ve Katksız Karışım Stabiliteleri.....	130
Çizelge 7.7	Yorulma Ömrü Tahmini.....	132
Çizelge 7.8	Karışım Performanslarının Değerlendirilmesi.....	137
Çizelge A.1	Geleneksel Bağlayıcı Karışım Dizaynı	145
Çizelge A.2	Vestoplast Katkılı Karışım Dizaynı	146
Çizelge B.1	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve % 4,5 Bitüm Muhtevası)	148
Çizelge B.2	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)	148
Çizelge B.3	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve % 5,5 Bitüm Muhtevası)	149
Çizelge B.4	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve % 6,0 Bitüm Muhtevası)	149
Çizelge B.5	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve % 6,5 Bitüm Muhtevası)	150
Çizelge B.6	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)	150
Çizelge B.7	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (5 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)	151
Çizelge B.8	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve % 4,5 Bitüm Muhtevası)	151
Çizelge B.9	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)	152
Çizelge B.10	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve % 5,5 Bitüm Muhtevası)	152
Çizelge B.11	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve % 6,0 Bitüm Muhtevası)	153
Çizelge B.12	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve % 6,5 Bitüm Muhtevası)	153

Çizelge B.13	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)	154
Çizelge B.14	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (15 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)	154
Çizelge B.15	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve % 4,5 Bitüm Muhtevası)	155
Çizelge B.16	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)	155
Çizelge B.17	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve % 5,5 Bitüm Muhtevası)	156
Çizelge B.18	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve % 6,0 Bitüm Muhtevası)	156
Çizelge B.19	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve % 6,5 Bitüm Muhtevası)	157
Çizelge B.20	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)	157
Çizelge B.21	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (25 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)	158
Çizelge B.22	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve % 4,5 Bitüm Muhtevası)	158
Çizelge B.23	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)	159
Çizelge B.24	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve % 5,5 Bitüm Muhtevası)	159
Çizelge B.25	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve % 6,0 Bitüm Muhtevası)	160
Çizelge B.26	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve % 6,5 Bitüm Muhtevası)	160
Çizelge B.27	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)	161

Çizelge B.28	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları (40 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)	161
Çizelge C.1	5 ve 15 °C Statik Sünme Deformasyonu (in./in.x10 ⁻⁶)	163
Çizelge C.2	25 ve 40 °C Statik Sünme Deformasyonu (in./in.x10 ⁻⁶)	167
Çizelge C.3	Statik Sünme Modülü (psi) (5-15-25-40 °C).....	172
Çizelge D.1	Tekrarlı Sünme Deneyi Sonuçları (in./in.x10 ⁻⁶)	174



ÖNSÖZ

Birlikte çalışmaya başladığım süre içerisinde gerek Doktora Tezim gerekse ulaşımın diğer konularında uygulamaya yönelik bilgiler kazanmamda, birikimi ve tecrübesiyle yararlandığım örnek insan Tez Danışmanım Doç. Dr. Mustafa ILICALI'ya,

Bu tezin hazırlanmasında sürekli yardım ve desteklerini gördüğüm Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Zerrin BAYRAKDAR ve mesai arkadaşlarım ve sürekli desteğini gördüğüm İnş. Y. Müh. Süreyya TAYFUR'a

Tezimin basılmaya hazır hale getirilmesi için, büyük bir zaman ayırarak katkı sağlayan değerli hocalarım, Prof. Dr. Emine AĞAR ve Doç. Dr. Güven ÖZTAŞ'a,

Tezin özellikle deneysel çalışmalarının yapılmasında en geniş imkanları sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları (İSFALT) A. Ş. Eski Genel Müdürü Abdülalim KARABIYIK ve yeni Genel Müdürü Hasan ARPACI ve Laboratuvar çalışanları Kalite Kontrol Müdürü Bekir Kadri EREN, Laboratuvar Şefi Gülağa KARADAĞ, Laboratuvar Teknisyenleri Erol TUNÇ, Levent GÜL, Servet HAN, Mustafa KOCABEY ve Muhittin ERGUN'a ve diğer çalışanlarına,

Tezin yazılmasında katkıları için arkadaşlarım Yük. Şehir Plancısı Salim KÜÇÜK, Şehir Plancısı Vedat USLU ve İnş. Müh. Bülent KORKMAZ'a

Sabırla bana maddi ve manevi destek veren aileme,

En içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Halit ÖZEN

ÖZET

Karayollarına olan talebin sürekli artması, taşıt teknolojisindeki gelişmeler, karayolunun ağır taşıt trafik yüklerine maruz kalması, olumsuz çevre koşulları gibi nedenler yapılan yolların tahmin edilen süreden çok daha önce bozulmalarına neden olmaktadır. Yoldaki bozulmaya çok sayıda faktör sebep olmakla birlikte ülkemizde bugüne kadar yapılan hizmet ömrü tahmin yöntemlerinin de yeniden gözden geçirilmesi yararlı olacaktır.

Bu çalışmada, asfalt tabakalarının performanslarının değerlendirilmesinde bazı ülkelerde kullanılan bozulma parametreleri olan;

- Yorulma çatlakları,
- Tekerlek izi veya kalıcı deformasyonlar

ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Bunun için literatür araştırmasından elde edilen teorik çalışmalardan yararlanılarak, ileriki bölümlerde açıklanan deneyler yapılmaktadır. Sonuç olarak geliştirilen bir yöntemle asfalt karışımların hizmet ömrü tahmininde çok önemli olan bilgiler verilmektedir. Yapılan bu çalışmalara ilişkin bir özet aşağıda verilmektedir.

Yapılan laboratuvar çalışmalarında geleneksel ve katkı karışımlara **Marshall Dizaynı, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Dolaylı Çekme, Statik Sünme, Tekrarlı Sünme** gibi deneyler uygulanmıştır.

Hizmet ömrünün tesbitinde önemli göstergelerden olan karışım değişkenlerinin karışımın elastisite ve sünme modülü üzerindeki etkisini ortaya koymak, karışım performansını değerlendirmek için örnek bir deneysel çalışma programı hazırlanmıştır. Ayrıca karışımların, hizmet ömrünün hesaplanması için bir Tekerlek İzi Tahmin Modeli kurulmuş ve yorulma performanslarının değerlendirilmesi için kurulmuş olan modellerden ülkemiz koşullarına uygun olanı tesbit edilmiştir. Böylece bu değerlendirmelerle karışımların yorulma ve tekerlek izi performanslarını tahmin etmek mümkün olmaktadır.

Günümüzde asfalt, bazı katkı maddeleri ile modifiye edilerek kullanılmakta ve ileride bu şekilde uygulamaların daha yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Geleneksel bağlayıcı veya karışımlara katkı maddelerinin ilave edilmesi ile hazırlanan modifiye karışımların bu tezde ortaya konan yöntemle değerlendirilmesini sağlamak ve bu konuda bir boşluk oluşturmamak için laboratuvarımız imkanları içerisinde hazır bulunan Vestoplast malzemesi ile katkı asfalt karışımlar da üretilerek model çalışmasına dâhil edilip ilave bir değişken olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Burada vurgulanması gereken, katkının cinsi değil, asfaltın farklı malzemelerle de karıştırılarak kullanılabileceği durumuna bir örnek teşkil etmesidir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar yardımıyla bitümlü karışım değişkenlerinin karışımın performansı üzerine olan etkisi değerlendirilmiş ve hizmet ömrü tahminine yönelik olarak bir model kurulmuştur. Bu modele, ileride yapılacak olan yeni çalışmalarla başka değişkenlerin de ilave edilmesi ile anlatılan yöntemle göre model geliştirilecek, böylece deney yapmadan daha doğru bir hizmet ömrü tahmin edilmesi sağlanmış olacaktır.

ABSTRACT

The continuous increase of demand to the highways, developments vehicle technology, the effect of heavy traffic loads and negative impacts of climate conditions damage on the highways before the end of expected service lives. There are numerous factors, that cause damages on the highways so it will be beneficial to check “Service Life Estimated Methods”, which have been in our country to date once more.

In this study, the rotten parameters (fatigue cracks, rutting or permanent deformation etc.) which are being used in some countries to evaluate the performance of asphalt layers are presented. By using the theatrical knowledge, which was provided by examining the related literature, the experiments which are presented in the following sections are being executed. As a result, such a method was achieved that some very important knowledge is given about the estimation of service lives of the asphalt mixtures. A summary regarding these studies are presented below.

Marshall Design, Indirect Tensile Strength Test, Indirect Tensile Test, Static Creep Test and Repeated Creep Test were performed on both conventional and modified mixtures during laboratory studies.

A sample experimental studying program was prepared to point out the effects of mixture variables on the elasticity and creep moduli, which serve as an important indicator on the evaluation of service life and evaluate the performance of mixture. Moreover, a rutting estimation model for our country was determined among several fatigue performance evaluation models. In this way, it will be possible to estimate the rutting and fatigue performances of the mixtures.

Nowadays asphalt is being modified by some additives and most probably the usage of these additives will be more common in the near future. In order to evaluate the modified mixtures, prepared by using additives in the mixtures or binders, by the model presented in this thesis; Vestoplast additives was used . By using Vestoplast, some modified mixtures were produced and it was made to serve as an addition variable. The remarkable point here is not the type of additive, but the possibility of modifying asphalt by using some different materials.

By the results obtained from the experiments, the effects of mixtures variables on mixture performance were evaluated, also a model established to estimate the service life, This model was so prepared that it will be possible to add some more variables as a result of future studies, which will let more precise service life estimations even without any experimental studies.

1. BAĞLAYICI TİP VE KARIŞIM DEĞİŞKENLERİ

Sıcak asfalt karışımları ;

-bağlayıcı (bitüm)

-agrega

-katkı maddeleri (bağlayıcıya veya karışıma katılan) olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır.

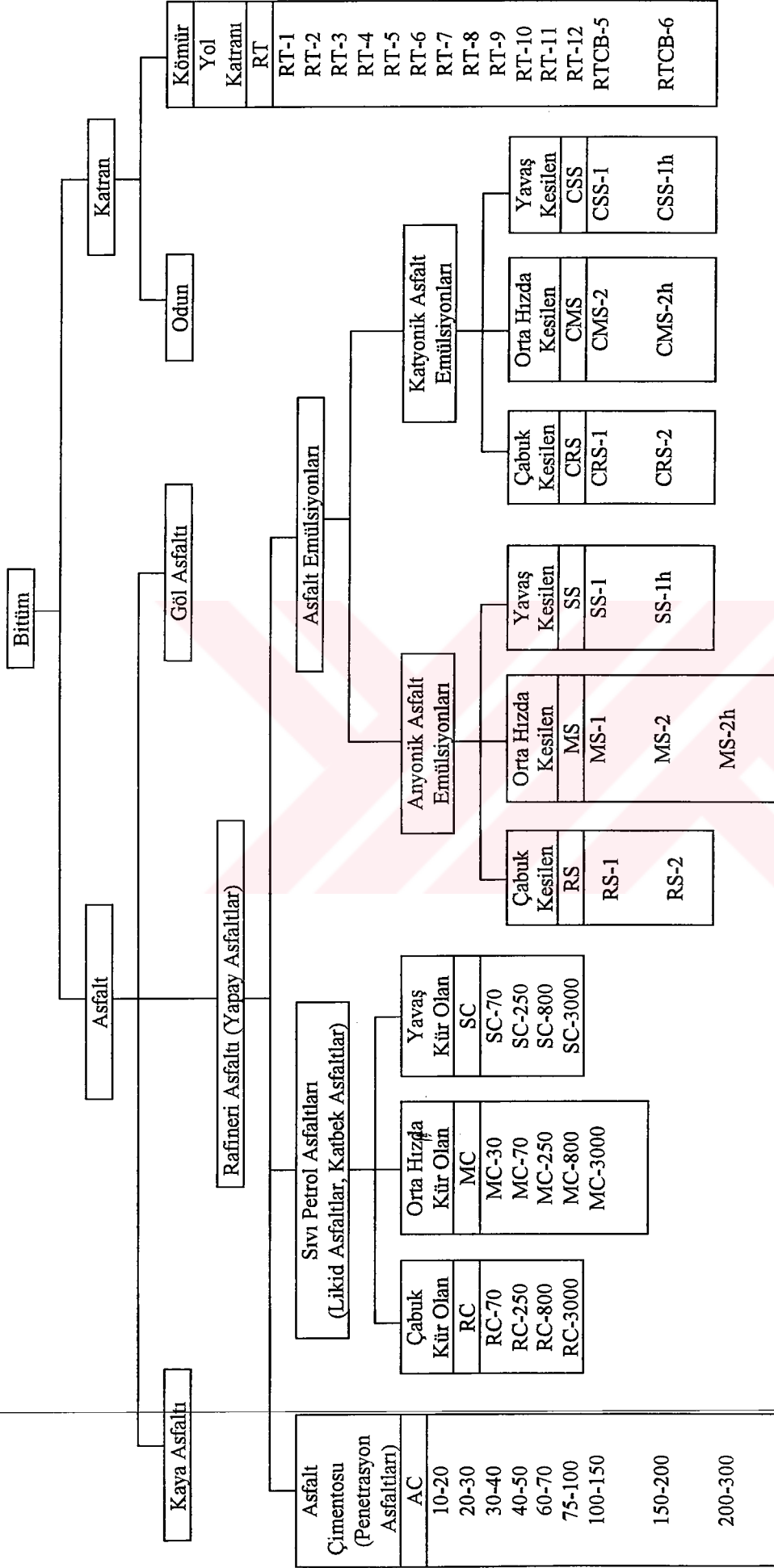
1.1 Bitüm

Sıcak asfalt karışımlarında bağlayıcı olarak bitüm kullanılmaktadır. Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle meydana gelen ergime sonucu oluşan) hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunlar gaz, sıvı, yarı-katı veya katı halde olabilen, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen çözülen madde olarak tanımlanır (Keçeciler vd., 1988). Yol malzemesi olarak kullanılan bitümlü malzemeler Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Bitüm asfalt ve katran olmak üzere iki ana bölüme ayrılmaktadır.

Asfalt

Koyu kahverenk’ten - siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvamlılık bakımından katı, yarı-katı veya sıvı halde olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün arıtılmasından elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Asfaltlar, kökenlerine göre doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olarak iki gruba ayrılabilir

Doğal asfaltlar, doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Bunlar da Kaya ve Göl asfaltı olarak ikiye ayrılırlar. Göl Asfaltı % 55 bitüm, % 35 mineral madde ve % 10 organik madde içerir. En iyi bilineni Trinidad Göl Asfaltıdır. Kaya asfaltları ise % 90 mineral madde ve % 10 bitüm içerirler.



Şekil 1.1 Yol malzemesi olarak bitüm çeşitleri

Yapay asfaltlar, ham petrolün arıtılmasından elde edilirler.

Petrol kuyularından çıkarılan ham petrol rafinerilerden pompalarla tanklara, buradan da ısıtma kulelerine gönderilerek sıcaklığı yükseltilir, daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılır. Bunlar hafif ürünleri, daha az uçucu olanlar aynı şekilde orta ürünleri, en ağır uçanlar ise ağır ürünleri meydana getirirler (Keçeciler vd.,1988).

Asfaltı içeren kalıntı maddeleri ise kulenin dibinde birikir. Bu şekilde ham petrol başlıca beş kısma ayrılmış olur:

- 1-Benzin (Gazolin),
- 2-Gaz yağı (Kerosen),
- 3-Dizel yağları (Mazot),
- 4-Yağlama yağları,
- 5-Ağır kalıntı maddeleri .

Bunların hepsine gerektiğinde tekrar damıtma işlemi uygulanarak daha değişik petrol ürünleri elde edilir (Keçeciler vd., 1988).

Asfalt çimentoları (Penetrasyon Asfaltı);

Kalıntı maddelerinin daha ileri damıtılmasından SC sınıfı yavaş kür olan yol yağları elde edilir ve geriye asfalt çimentosu kalır. Asfalt çimentoları AC ile gösterilirler ve 10-300 arasında değişen penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar. Bu penetrasyon asfaltlarının bir kısmı daha sert olanların daha yumuşak olanlar ile karıştırılmasından elde edildiği gibi, sert olanların yüksek kaynama noktalı bir yağ ile yumuşatılması suretiyle de elde edilebilir (Keçeciler vd., 1988).

Yol üstyapılarında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Penetrasyon asfaltlarının tamamı agregalar ile karıştırılmadan önce belirli derecelere kadar ısıtmaya ihtiyaç gösterirler.

Sıvı petrol asfaltları (Katbek Asfaltı);

Sıvı petrol asfaltları, asfalt çimentolarının farklı özellikli çözücülerle karıştırılarak işlenebilir hale getirilmesi ile elde edilirler. Asfalt çimentosu ile kaynama noktası düşük, yani kolay uçan bir çözücü (benzin, nafta) ile karıştırılarak çabuk kür olan RC Sıvı Petrol Asfaltları, orta derecede uçucu bir çözücünün (kerosen, gaz yağı) karıştırılması ile orta hızda kür olan MC Sıvı Petrol Asfaltları ve ağır yağlarla inceltirilerek yavaş kür olan SC Sıvı Petrol Asfaltları elde edilir.

Ayrıca sıvı petrol asfaltlarının her biri kendi aralarında kinematik viskozite değerlerine göre tiplere ayrılırlar. Sıvı petrol asfaltları, asfalt malzemesi ve çimentolu temel tabakalarının yüzeylerinde yapıştırma malzemesi olarak kullanılırlar (Keçeciler vd., 1988). Ayrıca bitümlü makadam ve ince daneli soğuk asfalt yapımında da kullanılmaktadırlar.

Asfalt emülsiyonları;

Emülsiyon, bir biri içinde çözünemeyen iki sıvıdan birinin diğeri içerisinde küçük küre tanecikleri halinde homojen olarak dağılmasıdır. Asfalt emülsiyonları da asfalt çimentosu (dağılan faz) küreciklerinin su (dağıtan faz) içinde dağılmasından oluşur. Bu işlem mekanik olarak yapılır, ancak asfalt küreciklerinin birbirine yapışarak sudan ayrılmalarını önlemek için emülgatör (emülsiyon verici madde) denilen katkı maddeleri kullanılır.

Asfalt emülsiyonları emülgatörün cinsine göre Anyonik ve Katyonik Asfalt Emülsiyonları olmak üzere ikiye ayrılır:

Bir asfalt emülsiyonu agrega ile karıştırıldığı veya bir yolun yüzeyine püskürtüldüğünde emülsiyon kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışırlar. Serbest kalan su buharlaşır. Yolda kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre:

1-Çabuk kesilen RS asfalt emülsiyonları,

2-Orta hızda kesilen MS asfalt emülsiyonları,

3-Yavaş kesilen SS asfalt emülsiyonları olarak üçe ayrılırlar (Keçeciler vd., 1988).

Asfalt emülsiyonlarının, dünyadaki kullanım miktarları her geçen yıl hızla artmaktadır. Ancak ülkemizde asfalt emülsiyonu tüketimi istenilen seviyeye ulaşmamıştır. Asfalt emülsiyonları belli başlı olarak;

- 1-Sathi kaplamalarda,
- 2-Karışım kaplamalarda,
- 3-Harç kaplamalarda,
- 4-Yama ve tamir işlerinde,
- 5-Penetrasyon makadam yol kaplamalarında, kullanılmaktadır (KAV, 1992).

Katran

Katran, kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle, katran bu şekli ile değil, arıtıldıktan sonra kullanılır. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir.

RT sembolü ile gösterilen yol katranları kıvamlılıklarına göre RT-1, RT-2 RT-12 ve RTCB-5, RTCB-6 olmak üzere 14 sınıfa ayrılırlar. Numaralar büyüdükçe kıvamlılık artar.

1.2 Katkı Maddeleri

Esnek üstyapı karışımlarında kullanılan bitümün, asfalt çimentosu, emülsiyonlar, katbekler gibi bütüm çeşitlerinin modifiye edilmesi mümkündür.

Piyasada çok çeşitli olarak bulunan katkı maddelerinin hepsinin amaçlanan iyileştirmeyi sağlayamadığı görülmektedir. Bunlardan bazıları sadece endüstriyel atıklardan oluşur ve katkı maddesi olarak piyasaya sürülür. Diğerleri ise yine bazı endüstri kollarının yan ürünleriyse de bağlayıcıdaki fiziksel ve kimyasal değişimleri sağlamak için formüle edilirler. İşte bu tip ürünler, özellikleri açıkça ortaya koyulmak suretiyle bitüm modifikasyonunda kullanılırlar. Her ürünün özellikleri belirli bir problemi çözebilmek için dikkatlice değerlendirilmeli ve bu şekilde istenen iyileştirmeler elde edilmelidir.

Karışımın özelliklerinin değiştirilebilmesi için karışım tasarımını değiştirmek veya bitüm miktarıyla oynamak yeterli olur gibi görünmekteyse de katkı kullanımı yeni olasılıklar ve seçenekler ortaya koymaktadır.

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

- 1- Katkı maddesi bitüme katılarak, 'modifiye bitüm' elde edilir.
- 2- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılarak, 'modifiye karışım' elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin tespit edilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ilave ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ilave karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma v.s. gibi sorunlarla karşılaşmamakta, ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi pratik olmamaktadır.

Bilindiği gibi bağlayıcı özelliklerin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemlerine göre daha pratik ve daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testlerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmakla birlikte üstyapı performansının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha temsili olmaktadır. Ancak, ülkemizde konuyla ilgili kurumlardaki laboratuvarlarda karışımlara yönelik test imkanlarının gelişmiş ülkelere göre düşük seviyede olduğu bilinmektedir. Karışıma yönelik test imkanlarının ülkemize transfer edilmesi ile gerek klasik üstyapı karışımlarının performanslarının daha sağlıklı bir şekilde tespit edilmesi bakımından gerekse bu karışımların iyileştirilmesi amacıyla kullanılacak katkı maddelerinin amacına uygun

seçilmelerinde büyük faydalar sağlanacaktır. Çizelge 1.1’de bitüm katkı maddelerinin genel bir sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 1.1 Katkı maddelerinin genel sınıflandırılması

TİP	ÖZELLİKLER	Modifiyerlerin Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Etkisi
1- Filler	- Mineral Filler : Taş tozu Kireç Portland çimentosu Uçucu kül - Karbon siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2- Uzatıcı (Extender)	- Sülfür - Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3- Kauçuk a) Doğal lateks b) Yapay lateks c) Blok copolymer d) İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	*
4-Plastik		Sertleştirme
5- Bileşim		*
6- Fiber	- Doğal : Asbest Taş yünü - Yapay : Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7- Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8- Antioksidan	- Kurşun karışımları - Karbon - Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9- Hidrokarbon	- Yeniden kullanıma ve gençleştirme yağları - Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşama Veya Sertleştirme
10- Soyulma önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

*Bazı malzemeler, sıcaklık sırasına bağlı olarak asfalt çimentosunu sertleştirir yada yumuşatır.

2.3 Karışım Değişkenleri

Asfalt betonu karışımları Çizelge 1.2 ‘de verilen karışım değişkenlerinden oluşmaktadır. Bu karışım değişkenleri asfalt betonu karışımının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler.

Çizelge 1.2 Karışım Malzeme ve Değişkenleri

Asfalt	Tipi
	Sertliği
Agrega	Tipi
	Granülometrisi
Katkı Malzemesi	Bitümün Modifiye Edilmesi
	Karışımın Modifiye Edilmesi
Karışım	Bağlayıcı oranı
	Boşluk Yüzdesi
	Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi
	Mineral Agregada İçerisindeki Boşluk Yüzdesi

Çizelge 1.2’de verilenlerin dışında karışım değişkenleri olarak karışımların su hassasiyeti, sıkıştırma derecesi gibi değişkenler de bulunmaktadır. Ancak Çizelge’de sadece bu çalışmada değerlendirilen karışım değişkenleri yer almaktadır.

2. YORULMA KAVRAMININ TANIMI

Bu bölümde karışım performansının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olan yorulma incelenmiştir.

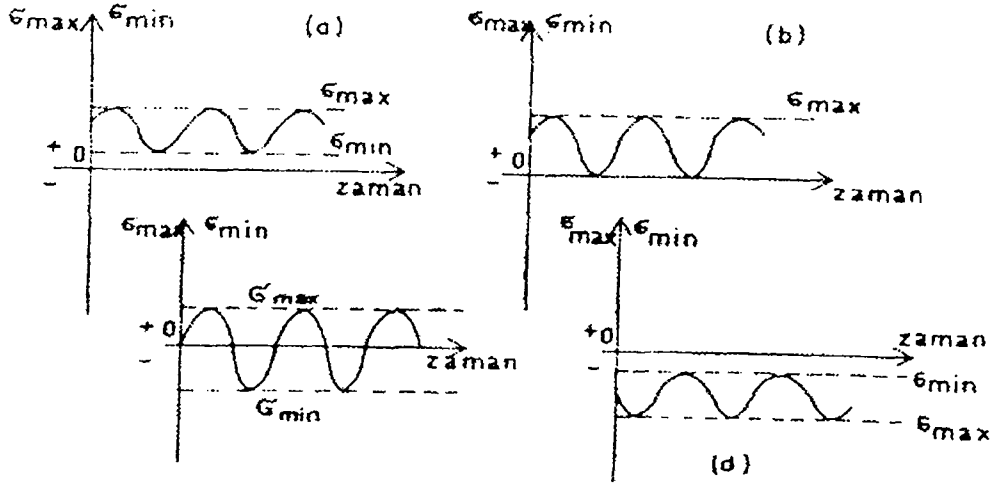
2.1 Bir Mukavemet Problemi Olarak Yorulma

Herhangi bir yapıyı oluşturan malzemelerin üzerine genel olarak yük etkisi

-statik

-dinamik

olmak üzere iki şekilde etkimektedir. Yapı içerisinde etkiyen bu yüklerden dolayı gerilme ve deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Yapı malzemesi statik yük etkisi dışında oluşan dinamik yük etkisinden dolayı farklı şiddet ve tipte (basınç ve çekme) gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu durum nedeniyle yapı malzemesinin herhangi bir kesitine ait bir noktada σ_{min} ile σ_{max} arasında değişen gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmelerin muhtemel durumları sinüzoidal bir yükleme durumuna göre Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde çekme gerilmeleri (+) işaretli olarak gösterilmiştir. Bu duruma göre (a)'da malzeme yalnız değişken çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. (b) de cisim yine çekme gerilmelerinin tesiri altında ise de burada σ_{min} sıfıra eşittir. (c) halinde ise $-\sigma_{max} = \sigma_{min}$ dır. 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 (Postacıoğlu, 1981).



Şekil 2.1 Gerilme Durumları

Malzeme bir defaya mahsus olmak üzere sabit hızda artan yüklere maruz bırakıldığı zaman belirli bir gerilme sınır değerinden sonra malzeme kopmakta ve bu kopmaya sebep olan gerilme ise malzemenin “statik mukavemeti” olarak tanımlanmaktadır.

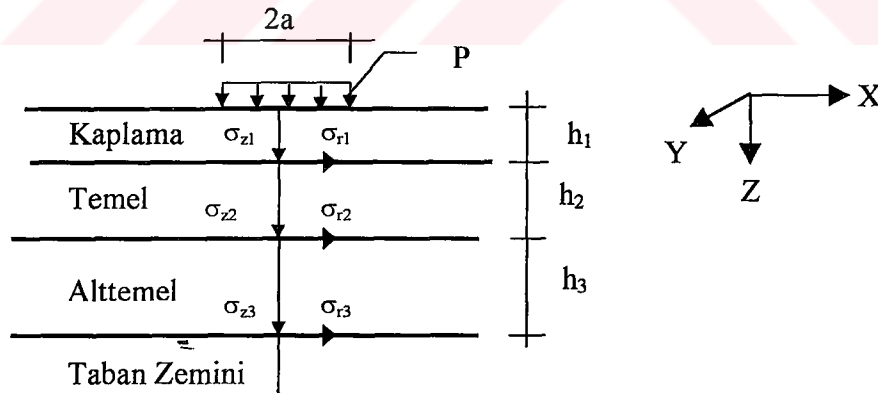
Hal böyle olmakla beraber deneyler gösteriyor ki, yükü belirli iki düzey arasında tutarak değiştirmek ve değişimin sayısını yeter derecede artırmakla bir malzemeyi statik sınırların çok altında da bozmak mümkündür. Yükleme ve boşaltmanın periyodik olarak çok tekrarrü, cisim içinde husule gelen ısısal ve mekanik olaylar yüzünden çözülme, yıpranma ve ayrılmalar doğurmaktadır. Burada kopma ve ayrılmanın ilk nedeni, yükün şiddetinden çok onun periyodik olarak uzun bir süre değişmesidir. İç mekanizması çok karışık olan bu olaya kısaca malzemenin yorulması denilmektedir.

Yorulmada kopma, çok defa, yüksek gerilmeli veya iç bünyede hata bulunan bir noktadan başlar, yükleme ve boşaltmanın tekrarlanmasıyla bu gevşek yerde ilerler, yıpranma yavaş yavaş bütün kesite yayılır; cisimde, statik denemede olduğu gibi, büyük ve haber verici bir uzama ve bozulma görülmez. Yıpranma yeter derecede ilerledikten sonra, kesitin geri kalan kısmı, yükü taşıyamaz hale gelir ve birden bire kopma olur; son ayrılma gerilmenin statik mukavemetini aşması nedeniyle oluşur (İnan, 1981).

Genel olarak, yorulma deneylerinde ise (σ_{min}) ve (σ_{max}) seçildikten sonra bu limitler arasında muayyen bir frekansla yükleme ameliyeleri yapılmaktadır. Alette mevcut bir sayaçtan yapılan toplam yükleme adedinin her an değerini bulmak kabil 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.

2.2 Asfalt Karışımlarında Yorulma

Karayolu esnek üstyapısı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı bir sistemdir (Şekil 2.2). Trafiğin ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan doğruya maruz kalan kaplama tabakası esnek üstyapılarda bitümlü karışımlardan yapılır. Kaplama tabakasının altındaki temel tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı ile işlem görmüş olan, belirli granülometrideki malzemeden oluşur. Temel tabakası; bağlayıcı olarak bitüm kullanılması durumunda bitümlü temel, çimento kullanılması durumunda ise çimentolu temel olarak isimlendirilmektedir. Alttemel ise belirli granülometrideki bağlayıcısız malzemeden oluşturulur (Umar vd., 1985; Ilıcalı, 1988).



Şekil 2.2 Karayolu Üstyapısı Kesiti

Şekil 2.2'den de görülebileceği gibi karayolu üstyapısında gerilmeler; trafik yükleri ve çevresel etkilerden dolayı oluşan değişimler sonucunda oluşmaktadır. Bu gerilmeler neticesinde üstyapı içerisinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşmakta ve üstyapı bu gerilmelerin etkisi ile bozulmaktadır.

Asfalt karışımı olarak imal edilen, trafik ve çevresel etkilere maruz kalan kaplama ve bitümlü temel tabakasında oluşan yorulma olayı, taşıt yüklerinin tekrarı neticesinde ortaya çıkmaktadır. Heukelom ve Klomp yorulmayı; "çevresel etkiler sonucunda sürekli değişimlerin yığılmalı olarak toplanıp, uygulanan gerilmenin, gerilme dayanımına eşit olmasını sağlayan durum" olarak tanımlamışlardır. Deacon ise yorulmayı "malzemede şartlara bağlı olarak sürekli olarak ilerleyen lokal ve sürekli gerilmelerdir 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 çatlağa çeviren tekrarlı yük devinimi olarak tarif etmişlerdir. Ilıcalı ise Malzemedeki yorulmayı; "tekrarlı ve değişen yükler altında malzeme içinde yer yer yapı değişikliklerinin ve çatlakların oluşması, bu etkilerin giderek malzeme mukavemetini de aşarak kırılmaya neden olması" olarak tanımlamaktadır (Yüce, 1972; Ilıcalı 1988). Harvey vd ise yorulmayı "karışımın bozulmaksızın tekrarlı yüklere karşı koyma yeteneği" olarak tanımlamaktadır (Harvey v.d., 1997).

3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN YORULMA DİRENİMİ DENEY YÖNTEMLERİ ve DENEY DEĞİŞKENLERİNİN YORULMA DİRENİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Bitümün reolojik bir yapıya sahip olması nedeniyle; yük altındaki davranışı, yükün uygulanma süresine, şekline ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir (Yağız vd., 1967). Bu nedenle, asfalt karışımlarının yorulma direnimlerinin tespiti için çok farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu bölümde laboratuvar çalışmalarında uygulanan deney yöntemleri, deneylerin uygulanma aşamalarında asfalt karışımlarının yorulma direnimleri üzerinde etkili olan değişkenler tanımlanmakta ve bu değişkenlerin yorulma direnimi üzerinde olan etkisi açıklanmaktadır.

3.1 Yükleme Modu

Yükleme modu yorulma direniminin laboratuvar deneyleri sırasında yük tekrarında gerilme ve deformasyon için tanımlanan sınırlamalardır. Ayrıca, yorulma direnimi de 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 rijitliğe) bağlı olarak bu deneylerin sonuçları oldukça farklı olabilmektedir. Deney sonuçları karışım tasarımlarını da yönlendirmektedir.

Yükleme modu faktörü ile ilgili olarak;

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

MF: Mod faktörü

A: C'nin rijitliğindeki azalmadan dolayı gerilmedeki değişimin yüzdesi

B: C'nin rijitliğindeki azalmadan dolayı deformasyondaki değişimin yüzdesi

C: Keyfi bir değerdir. Fakat tekrarlı yüklemeler altında kümülatif yorulma bozulmasından sonuçlanan rijitlikteki sabitleşmiş azalmadır.

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 Çizelge 3.1 'de bir özet sunulmuştur.

Çizelge 3.1 Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Yükleme Durumlarının Karşılaştırılması (Monismith, vd., 1990)

Değişkenler	Gerilme (yük) Kontrollü	Deformasyon (yerdeğiştirme) Kontrollü
Asfalt Tabaka Kalınlığı	Kalın asfalt tabakaları	İnce asfalt tabakaları <3"
Kırılma anı; yük tekrerrür sayısı	Numunenin kırıldığı ana göre tespit edilmektedir	Deney esnasında keyfi olarak belirlenmektedir. (başlangıç deformasyonunun % 50 'si gibi)
Yorulma deney datalarının dağılımı	Az dağınık	Daha fazla dağınık
Gerekli numune sayısı	Az	Fazla
Uzun dönemli etkilerin tanımlanması	Yaşlanma sonucu rijitliğin artması ve muhtemel yorulma ömrü artışı	Rijitliğin artması sonucu yorulma ömrünün azalması
Yorulma ömrü büyüklüğü	Kısa	Uzun
Karışım değişkenlerinin etkisi	Hassas	Daha az hassas
Enerji harcama oranı	Hızlı	Yavaş
Çatlak yayılma oranı	Arazideki değerden daha hızlı	Arazi koşullarını daha iyi temsil etmekte
Yük uygulanma periyodunun etkisi	Faydalı	Daha az faydalı

Çizelge 3.2'de ise karışım özellikleri ve yükleme moduna bağlı olarak, asfalt karışımının yorulma ve rijitlik modülündeki değişim verilmiştir.

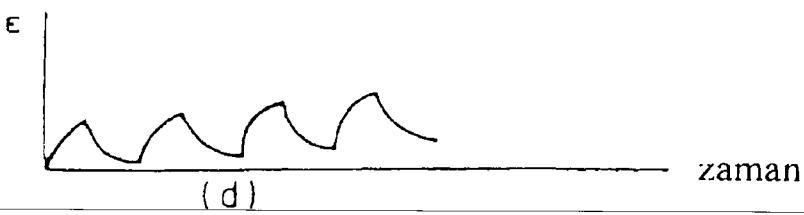
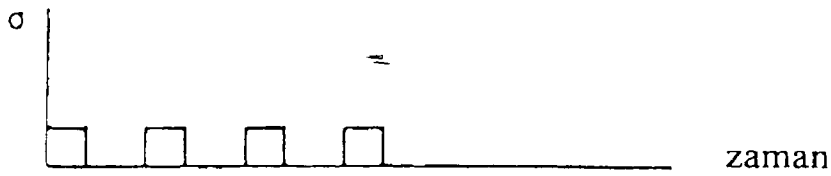
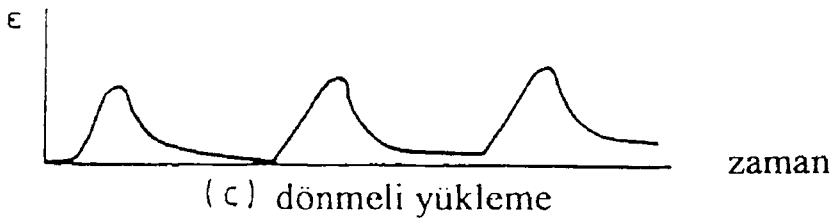
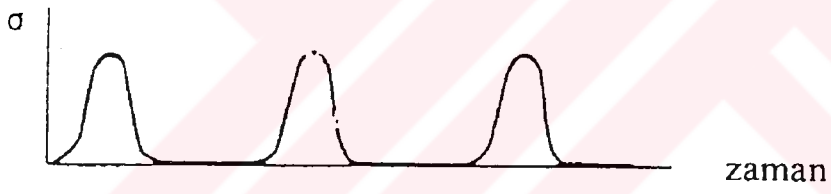
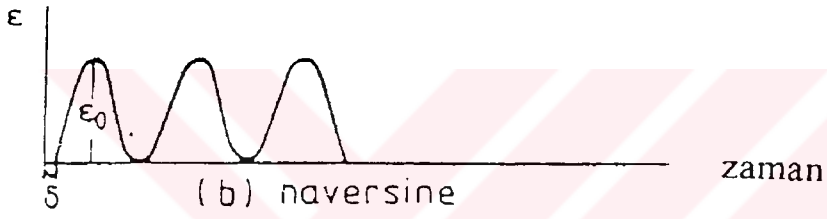
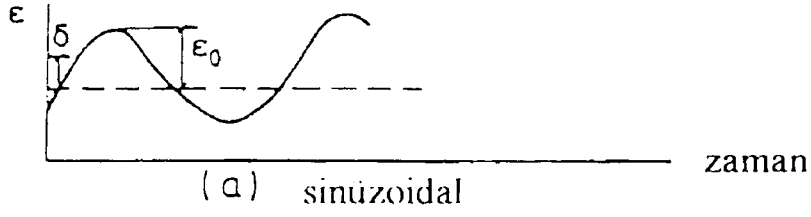
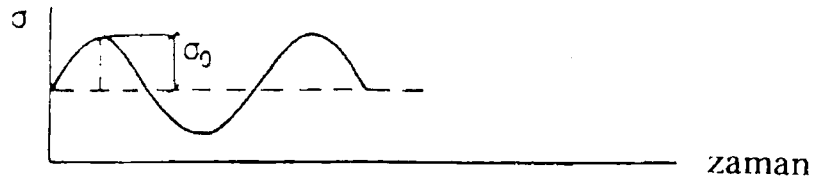
Çizelge 3.2 Yükleme Modu ve Karışım Değişkenlerinin Yorulma ve Rijitlik Üzerine Olan etkisi (Monosimith, vd., 1990)

Karışım Özellikleri	Değişim	Değişimin Rijitlik Üzerindeki Etkisi	Değişimin Yorulma Üzerindeki Etkisi	
			Gerilme-Kontrollü Mod	Deformasyon-Kontrollü Mod
Asf. Viskozite	Artınca	Artıyor	Artıyor	Azalıyor
Asf. Muhtevası	Artınca	Artıyor	Artıyor	Artıyor
Gradasyon	Açılınca	Artıyor	Artıyor	Azalıyor
Boşluk	Azılınca	Artıyor	Artıyor	Artıyor
Sıcaklık	Azılınca	Artıyor	Artıyor	Azalıyor

Çizelge 3.2 incelenirse karışımın rijitliğinin karışım değişkenleri ile değişmesi ile gerilme-kontrollü yükleme modunun yorulma direnimi üzerindeki etkileri arasında bir bir benzerlik olmasına rağmen aynı durumu deformasyon-kontrollü yükleme modu için söylemek söz konusu olmamaktadır.

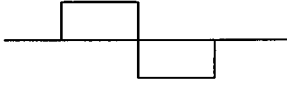
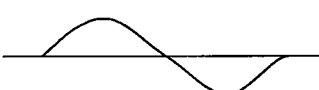
3.2 Yükleme ve Çevre Değişkenleri

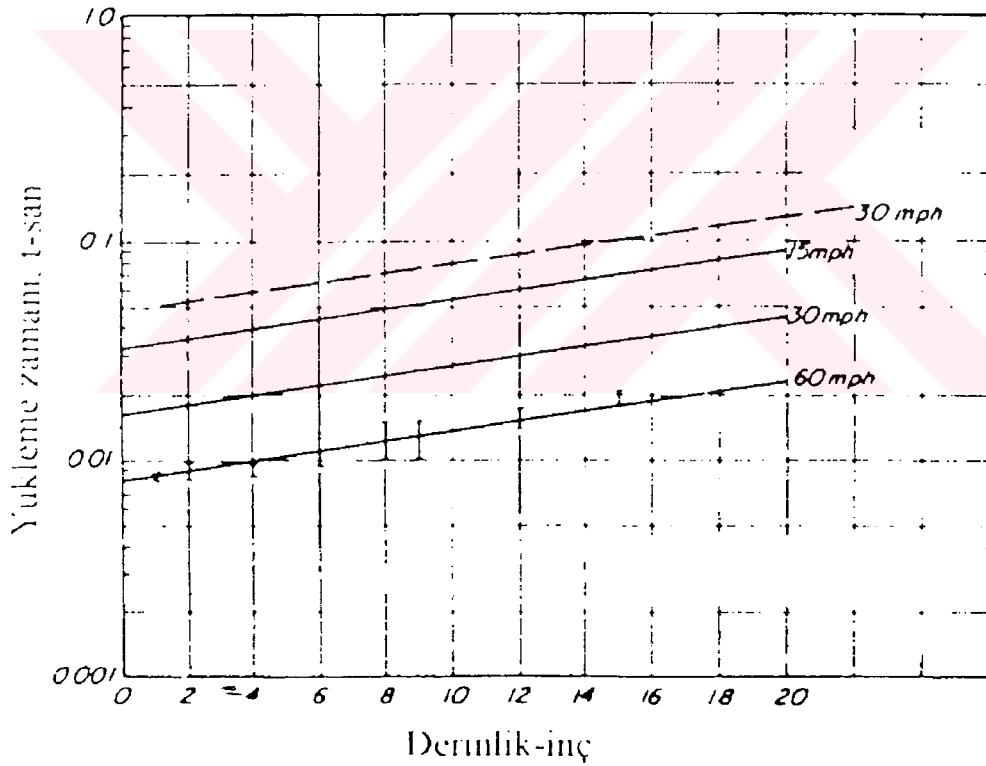
Yük ve çevre değişkenlerinin her ikisi de doğrudan veya dolaylı olarak yorulma direnimi üzerinde etkilendirler. Doğrudan etkiler olarak laboratuvar şartlarında uygulanan yükün uygulanma süresi ve şekli ile deney sıcaklığı verilebilir. Şekil 3.2’de laboratuvarda uygulanan yorulma deney metotlarında kullanılan genel yük şekilleri gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.3’de ise yük uygulaması dalgalanma şeklinin yorulma direnimi üzerinde olan



Şekil 3.1 Laboratuarda Uygulanan Genel Yük Şekilleri

Çizelge 3.3 Dalga şeklinin yorulma direnimi üzerine olan etkisi (Monosimith, vd., 1990)

Dalga Şekli	Sıcaklık °C	Gerilme MN/m ²	Başlangıç Defomasyonu	Yorulma Ömrü	İzafi Ömür
	25	±0,33 (48 psi)	$1,7 \times 10^{-4}$	24690	0,42
	25		$1,2 \times 10^{-4}$	58950	1,0
	25		$0,67 \times 10^{-4}$	85570	1,45



Şekil 3.2 Yüklü sürenin üstyapı derinliği ile hıza bağlı olarak dağılımı

Ağır trafik yüklü üstyapılarda karışım rijitliğinin artması diğer değişkenlerin sabit kalması durumunda yorulma ömrü artmaktadır. Yaşlanma nedeniyle arazi karışımlarının rijitliği artmaktadır. Bunun da trafikten dolayı bozulma ve tabii durumdaki hava boşluğundaki yükselmenin etkisini dengelemesinden dolayı oluşmaktadır. Ancak yaşlanmadan dolayı

asfaltın sertliğinin artması onun soğuk havalardaki kırılma direnimini (kırılma direnimi) azalttığı da gözönünde tutulmak gerekir. Trafik nedeniyle oluşan sıkışma da yorulma direnimini etkilemektedir. Rainthby ve Ramshaw'nın (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 artış da yorulma ömrünü etkilemektedir (Monosmith, vd., 1990).

3.3 Deney Yöntemleri ve Gelişimi

Yorulma deneylerindeki ana düşünce, numuneye tekrarlı yüklemeler altında elastik olmayan deformasyona izin vermektir. Trafik yükleri altında üstyapı, karışım yoğunluklarının artması, kayma kuvvetleri ve temel oturmasından dolayı elastik olmayan deformasyonlara maruz kalarak deforme olabilmektedir. Tüm bunlar ile birlikte projesine ve inşaat yöntemlerine uygun olarak yapılan üstyapılarda kalıcı deformasyonlar çok az olmakta ve ayrıca bu deformasyonlar er veya geç (temelde olan oturmalarla birlikte oluşan) durmaktadır.

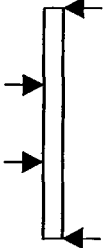
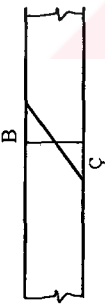
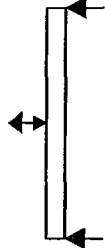
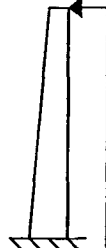
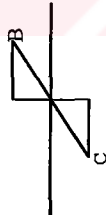
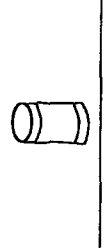
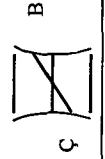
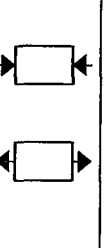
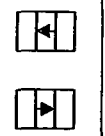
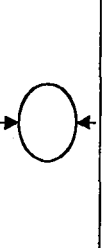
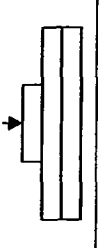
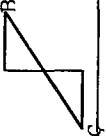
Bazı laboratuvar deneylerinde tersinir gerilme uygulanmaktadır. Bu da kümülatif deformasyonları azaltmakta veya bitirmekte ve araziye trafik yükleri altındaki gerilme durumunu daha iyi temsil etmektedir. Diğer dairesel ve bazı eksenel tip deneylerde ve mesnetli eğilme deneylerinde bu yapılamamaktadır.

Laboratuvar yorulma deneylerinde, tek vuruşlu yüklemeye daha çok üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerlek yükü tarafından uygulanan üç sürekli yükleme vuruşunun uygulanması tercih edilir. 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 (Rainthby vd., 1972). Bu basınç gerilmelerinin olmaması durumunda yorulma ömründe yaklaşık %10-15'lik bir artma meydana geldiği görülmektedir (Barksdale, 1977).

Çizelge 3.4’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. Ayrıca Çizelge 3.5’de yorulma deneylerinin kronolojik bir sıralaması gösterilmiştir. Karakteristikleri ise yük konfigürasyonu, gerilme dağılımı, yük dalgasının şekli, yük frekansı, kalıcı deformasyonun oluşumu, gerilme durumu ve üniform gerilme zonunun görünümüdür. Bu çizelgeden 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 yok eden tersinir yüklü veya yüksüz çeşitli vuruş şekillerinde (üçgensel, dairesel, v.d.) yapılırlar. Eksenel deneylerde dinlenme periyotlu veya periyodsuz 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 periyotsuz) daha kısa yorulma ömrü vermektedir. Bu nedenle de laboratuvar deneyleri daha hızlı bir şekilde tamamlanabilmektedir.

Çizelge 3.4 Yorulma Deney karakteristikleri

Deney	Yükleme Durumu	Gerilme Durumu	Dalga Tipi	Yükleme Frekansı	Performans Deformasyona İzin Var mı?	Gerilme Durumu	Kırılma Oluşuyor mu?
Üç Noktalı Eğilme			Yarı Sinüzoidal	1-1,67	hayır	Tek Eksenli	evet
Orta Noktalı Eğilme			Sin, Üçgensel Diktörtgensel	1:100	hayır	Tek Eksenli	hayır
Konsol			Sin, Üçgensel Diktörtgensel	25(Bonnot) 1:100 (Van Dijk)	hayır	Tek Eksenli	hayır
Dönen Konsol				16,67	hayır	Tek Eksenli	evet
Eksenel				8,33-25,0	hayır	Tek Eksenli	evet
Dairesel		Daha sonraki bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır.		1,0	evet	İki Eksenli	hayır
Destekli Eğilme			Yarı Sinüzoidal	0,75	evet	Tek Eksenli	hayır

Çizelge 3.5 Yorulma deney metot ve değerlendirmelerinin kronolojisi

Yıl	Araştırmacı	Deney Yöntemi	Değerlendirme Yöntemi
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	Gerritsin ve Jongeneel	Konsol Yükleme	Deformasyon Kontrollü
1987 AAPT	Button, Little, Kim ve Ahmed	Eğilme	Gerilme Kontrollü, Deformasyon Kontrollü ve Bozulma Mekanizmalı
1986 TRR 1096	Bonnot	Doğrudan Gerilme ve Konsol Yükleme	Gerilme Kontrollü
1985 AAPT	Monosmith, Epps ve Finn	Üç Noktalı Eğilme	Gerilme Kontrollü, Deformasyon Kontrollü
1984 AAPT	Molenaar	Dinamik Gerilme	Gerilme Kontrollü ve Bozulma Mekanizması
1983	Little ve Richey	Dairesel	Gerilme Kontrollü ve Gerilme zarfı
1982	Bonnaure, Gravois ve Udron	Orta Noktalı Eğilme	Deformasyon Kontrollü
1982 5. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem.	Mhoney ve Terrel	Destekli kirişler ve tekerlek izi	Orta nokta yükleme modu
1981 AAPT	Monismith	Üç Noktalı Eğilme	
1980	Bonnaure ve, Gravois ve Udron	Çeşitli Uzmanların, temel test yöntemlerini içeren 146 yorulma eğrisinin regasyonu	Gerilme kontrollü ve dformasyon kontrollü
1979 AAPT	Ulitz		Gerilme Kontrollü, bozulma mekanizması ve gözlenmesel korelasyon faktörleri
1978 AAPT	Braksdale	Destekli Kirişler	Orta Yükleme Uygulaması
1977 4. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Classen, Edwards, Sommer ve Uge	Enerjinin sabitliği yöntemi	Gerilme deformasyon limiti kriteri
1977 AAPT	Van Dijk	Konsol yükleme ve ort ,3+a nokta yüklemesi	Gerilme kontrollü, deformasyon kontrollü, enerjinin sabitliği teorisi
1977 AAPT	Ruth, Garry ve Oslan	Eğilme ve Dairesel	Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü
GIT-7305	Barksdale	Destekli Kirişler	Orta yükleme yöntemi
1976 FHWR791 ve 92	Majidezadeh	Destekli Kirişler	Bozulma mekanizması
1976 AAPT	Finn		
1975 AAPT	Pell ve Cooper	Döner eğilme eksenel yorulma	Gerilme kontrollü
1973 HRB Özel rapor 140	Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü ve dformasyon kontrollü
1973 HRB Özel rapor 140	Pell	Döner eğilme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü ile karşılaştırmalı
1973 HRB Özel rapor 140	Deacon		Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü ve sayısal yöntemler
1973 HRB Özel rapor 140	Finn	Servis kabiliyeti indeksi	Servis kabiliyeti ile çatlama derecesi arasında kurulan korelasyon

1973 HRB Özel rapor 140	Terrel	Monismith , Kingdam ve Kallas'ın çalışmalarından örnekler	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1973 HRB Özel rapor 140	Witczak	AASHO yol testi sonuçları ve bilgisayar programları	Verilen yük tekrarrüne denk gelen müsaade edilebilir deformasyon
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Bennot	Konsol Yükleme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Kirk	Üç noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Witczak	Kingham'ın Yorulma sonuçları, AASHO'nun tam derinlikli asfalt betonunun yorulma bağlantıları	Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu kriteri
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Kingham ve Kallas	Orta noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Van Dijk, Moreaud, Quedeville ve Uge	Konsol ve orta noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1972 3. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Vertsraeten	Konsol yükleme	Gerilme Kontrollü
1972 RRL LR496	Raithbay ve Sterling	Silindirik eksenel gerilme deneyleri	Gerilme Kontrollü
1972 AAPT	Monismith ve Salam	Üç noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü
1971 Ph. D., Natal Üniversitesi	Freeme	Konsol Yükleme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1969 AAPT	Pell ve Taylor	Dönmeli Konsol Yükleme	Gerilme Kontrollü
1969 Ph. D., UC Berkeley	Epps	Üç noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1969 AAPT	Epps ve Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1969 AAPT	Santucci ve Schmidt	Üç noktalı eğilme	Deformasyon kontrollü
1967 2. Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	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, deformasyon kontrollü
1964 TE 64-2 ITTE, UC Berkeley	Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme kontrollü
1964 TE 64-2 ITTE, UC Berkeley	Monismith	Üç noktalı eğilme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
1962 Intl. Conf. On Str. Des. Of Asp. Pavem	Pell	Eğilme ve Bükülme	Gerilme Kontrollü, deformasyon kontrollü
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 tekrarlı yükler nedeniyle oluşan eğilmeler	

Asfalt betonunun yorulma davranışının ölçümünde kullanılan yöntemlerin genel sınıflandırması;

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 yönteminde kirişler veya plaklar arazideki yükleme modu ve gerilme durumunu temsil edecek şekilde mesnetlenirler.
3. Doğrudan Eksenel (Direct Axial): Bu deney de yükler, 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. Tekerlek-İzi 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.

3.3.1 Basit Eğilme Deneyleri

Çoğunlukla yorulma deneyi bilgileri, basit eğilme deneylerinde numunelere uygun olmayan karışım karakteristikleri sergileyinceye veya bozuluncaya kadar gerilme ve deformasyon tekrarlarına maruz bırakılmasıyla elde edilmektedir.

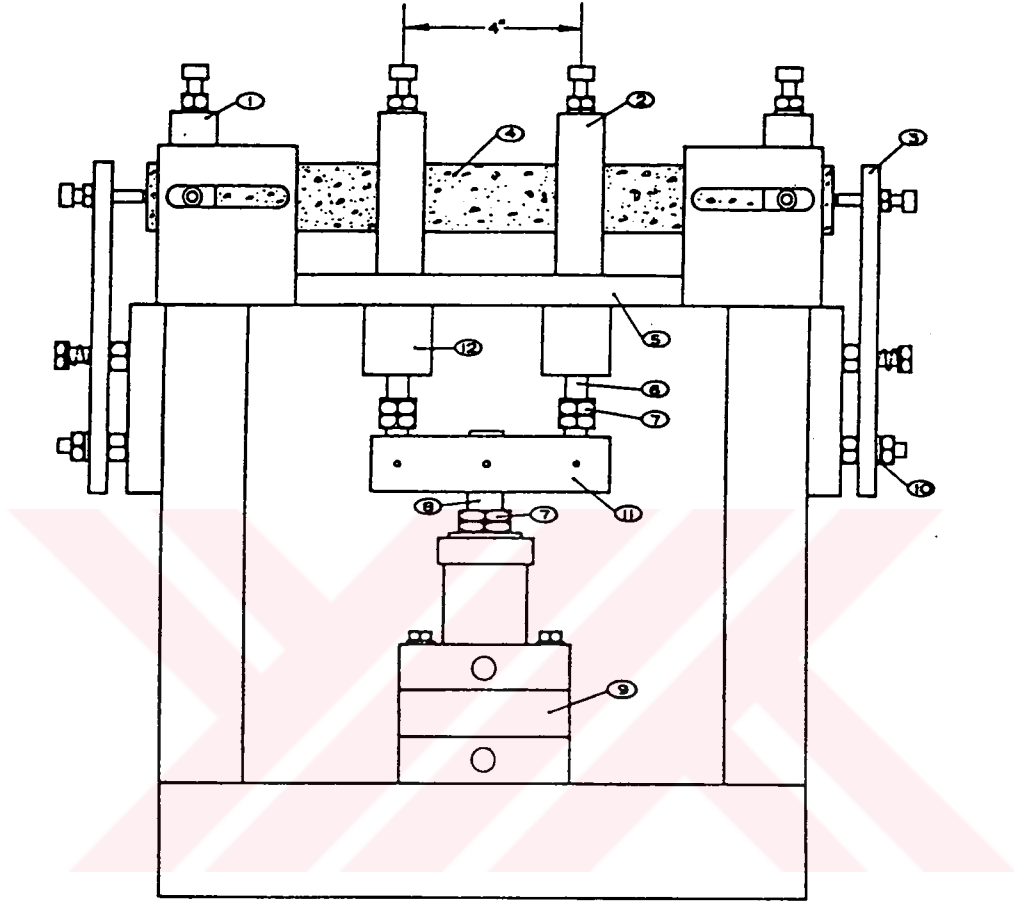
Asfalt betonu karışımların yorulma karakteristiklerinin araştırmak için farklı tipte Basit Eğilme deneyleri geliştirilmiştir. Bunlar;

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

3.3.1.1 Orta ve Üç Nokta Yükleme Deneyi

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 3.3). University of California ekipmanı için 1,5x1,5x15 in. ve Asphalt Institute ekipmanı için ise daha büyük boyutta 3x3x15 in. boyutlarında numuneler kullanılmaktadır.



- | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 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 3.3 Üç Noktalı Eğilme Deney Aparatı

Yük iki yönde uygulanmaktadır. Bu şekilde ile 100 mm/s hızla 0,1 sn. yüklenme zamanına sahip yük vuruşları uygulanmaktadır. Kontrollü yük (gerilme) ve şekil değiştirme (deformasyon) yük modlarının her ikisi de yapılabilir.

Amsterdam'da bulunan, The Shell Laboratory Şekil 3.4'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.

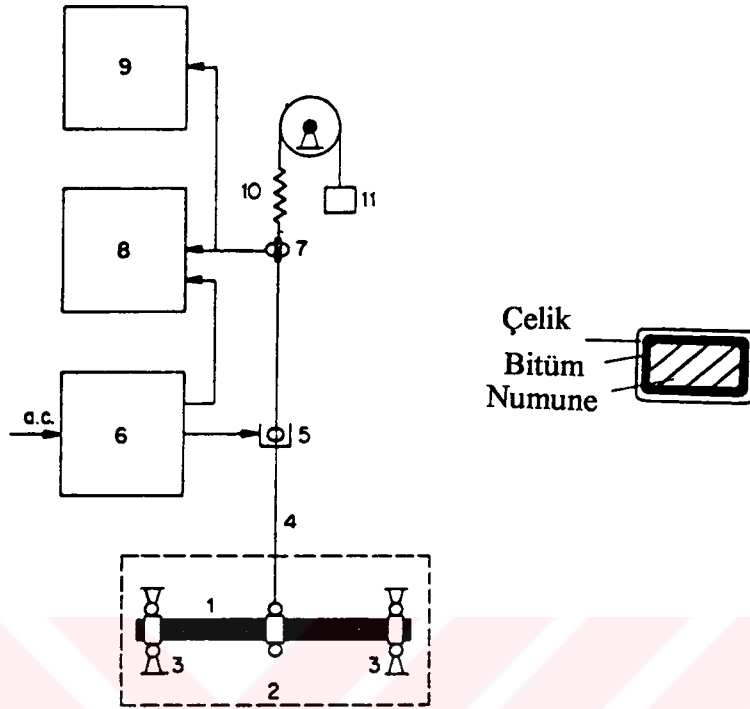
3.3.1.2 Konsol Yükleme Deneyi

Dönen Yükleme: University of Nottingham'da (Pell vd., 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 3.5). Deneylerin 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 3.6'da gösterilen kontrollü-deformasyon burulma yorulma makinesi kullanılmıştır.

Trapezoidal Kirişlerin Sinüzoidal Olarak Yüklenmesi: Trapezoidal numuneler üzerinde deneyler Shell araştırmacıları (van Dijk, 1975) Belçikalı araştırmacılar ve LCPC (Bannot, 1986) tarafından yürütülmüştür. Şekil 3.7'de LCPC ekipmanı gösterilmiştir.

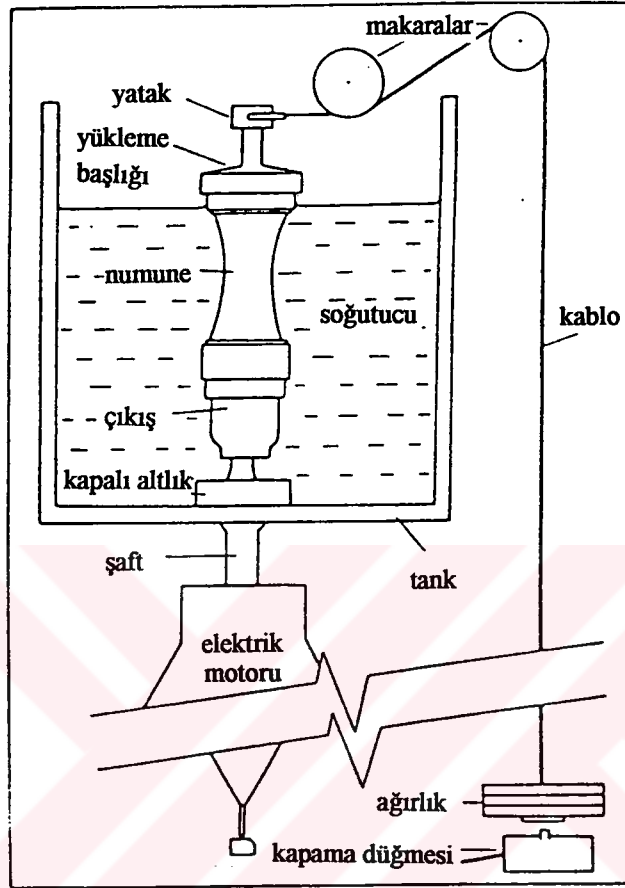
Trapez numunenin daha büyük kenarı sabitlenmiş ve daha küçük kenarına sinüzoidal olarak deformasyon (Bannot, 1986; van Dijk, 1975 ve Verstraeten, 1972) ve gerilmeden (Kunst, 1989) herhangi biri uygulanmıştır.

Doğru trapez boyutlarının seçilmesi ile numuneler büyük kesitlerden ziyade en büyük eğilme gerilmesinin olduğu numunenin yaklaşık olarak orta noktasından bozulacaktır. Van

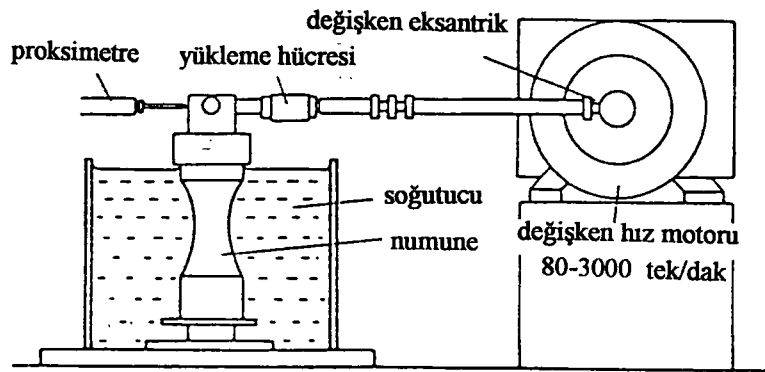


1. Çelik köşebent içindeki numune
2. Termostat
3. Sabit köşebentler
4. Vibratör mili
5. Elektrodinamik vibratör
6. Akım ölçer
7. Elektrodinamik transduser
8. Faz açısı ölçer
9. Voltmetre
10. Yumuşak yay taşıyıcısı
11. Dengeleyici ağırlık

Şekil 3.4 Orta Nokta Eğilme Aparatı (vanDijk, 1972)

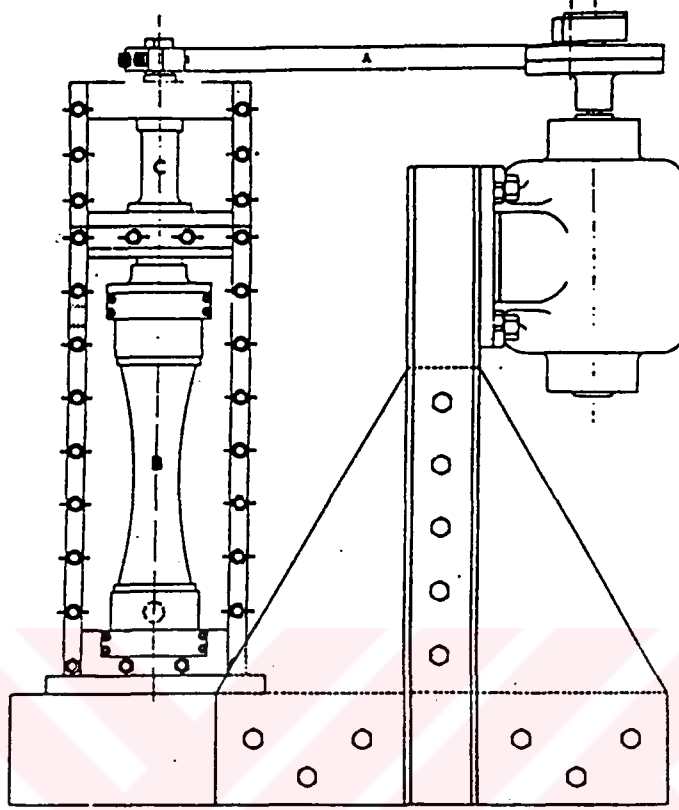


(a) Gerilme kontrollü Döner eğilme

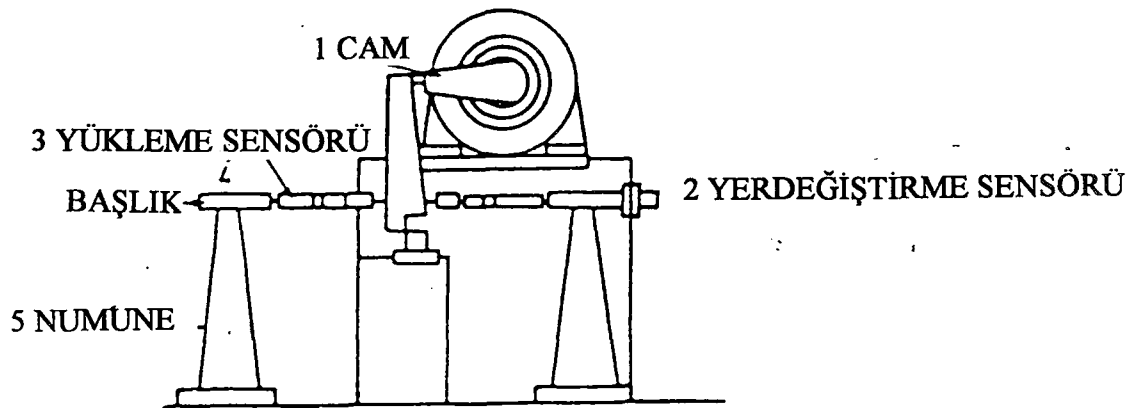


(b) rijitlik makinesi

Şekil 3.5 Eğilme Aparatı (Pell)



Şekil 3.6 Deformasyon Kontrollü Burkulma Makinesi



Şekil 3.7 Bükme Yorulması Deney Makinesi

3.3.2 Mesnetli Eğilme Deneyi

Arazideki yükleme modunu daha iyi temsil etmektedir. Birkaç araştırmacı bir hava yastığı (Jimenez vd., 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.

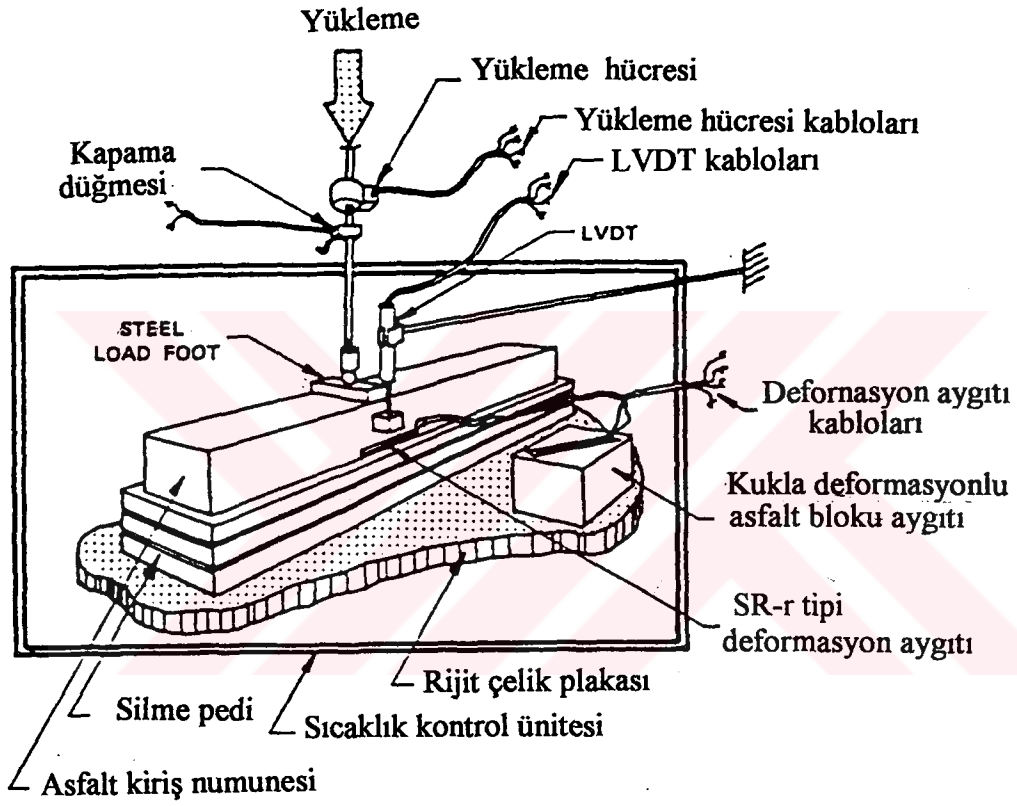
Ayrıca Barksdale (1977) tarafından asfalt betonu temellerin yorulma karakteristiklerini tespit etmek için kiriş yorulma deneyleri kullanmıştır. Bu yöntemde, arazideki mesnetlenme şartlarına benzetmek için lastik yataklar üzerine kirişler yerleştirilmiştir (Şekil 3.8). Yorulma deney ekipmanı bir yük hücresi, bir 4 in. Kalınlıklı (102 mm) lastik yatak (284 pci veya 7,861gr/cm³ taban zemini reaksiyon modüllü) destekli kiriş ve bir hava basınçlı yükleme sisteminden ibarettir. Numuneler ve lastik destek 80 °F (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.

3.3.3 Doğrudan Eksenel Yükleme Deneyleri

3.3.3.1 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.



Şekil 3.8 Yorulma Deney Makinesi

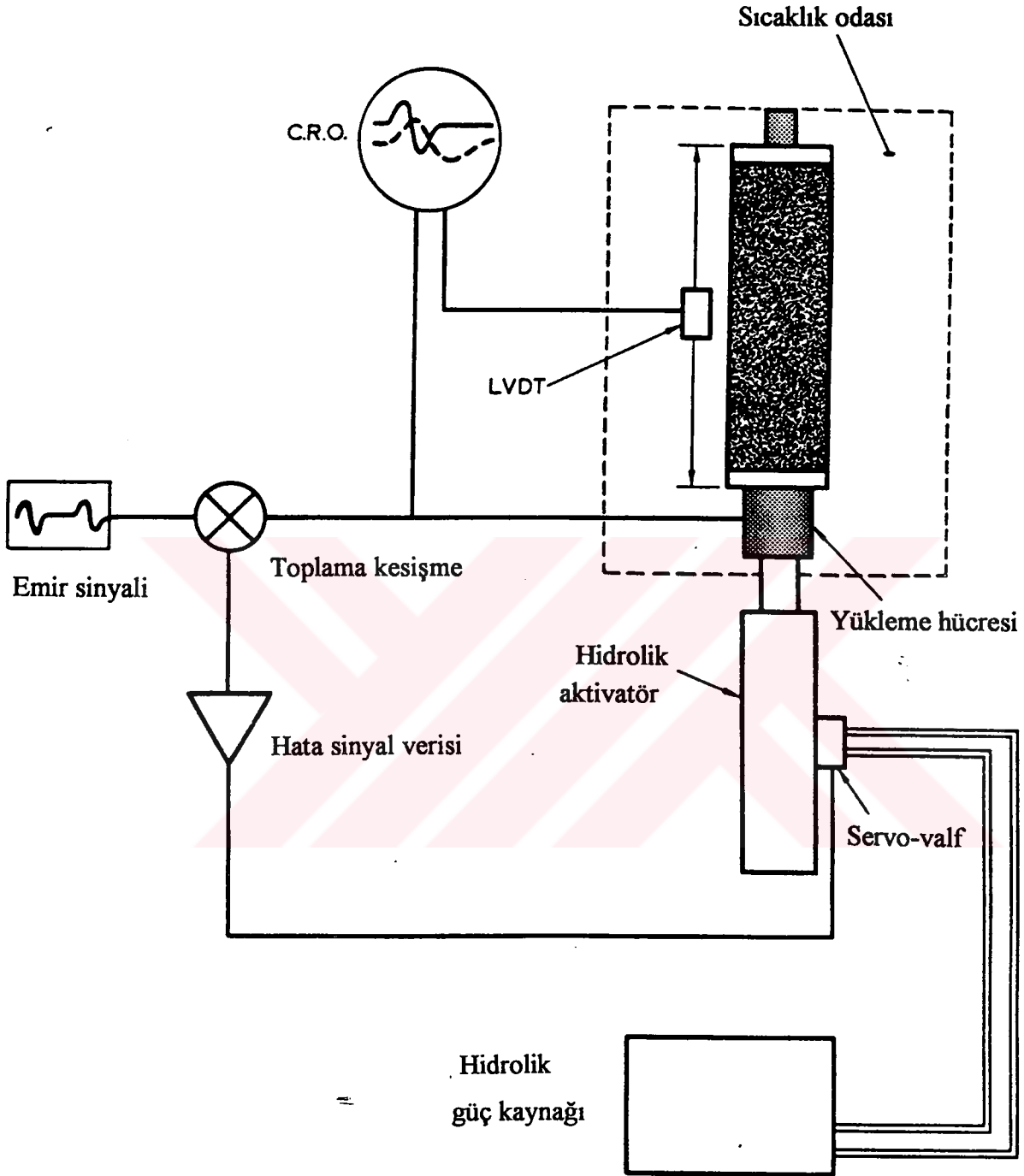
3.3.3.2 Çekme/Basınç

Yorulma deneyinin bu şekli TRRL (Raithby, 1972) tarafından geliştirilmiştir. Bir servo kontrollü elektro hidrolik makine kullanılarak eksenel çekme ve basınç yükü uygulanmaktadır. Numuneler, 75 mm^2 kesit alanlı 255 mm uzunluklu prizmalardır (Şekil 3.9). 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 % 30'dur.

3.3.4 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.



Şekil 3.9 Doğrudan Eksenel Yorulma Deneyinin Şematik Temsili

Bu deneyi uygulamak için uygulama açısından oldukça basit ve temel karakteristiklerin tespit edilmesi için efektif bir metottur (TRR, 1492). Bir çok araştırmacı malzemeleri değerlendirmek ve üstyapıyı analiz etmek için bu deneyden yararlanmıştır. (Kennedy vd., 1983 ve 1968; Scholz, Hicks vd., 1989; Khasla vd., 1985; Schmidt, 1971)

Ekipman ve Prosedür: Yükleme konfigürasyonu, yüklemelerin elektro-hidrolik veya havalı sistemler gibi farklı yöntemler ile uygulanabilir. Genellikle yarı sinüzoidal yükleme uygulanır. Kennedy ve Ömer (1985) dakikada 20 tekrarluluk frekans ve 0,05 saniyelik yükleme zamanı kullanmıştır.

Deney numuneleri genellikle 4 in. çapında ve 2,5 in. yüksekliktedir. 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 3.10 ve 3.11) numunenin merkezindeki gerilmeler;

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

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

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_t =Dolaylı çekme gerilmesi (dikey)

Numunenin merkezinde dik yöndeki basınç gerilmesi yatay çekme gerilmesinin üç katıdır. İlave olarak eğilmeli kiriş ve dairesel yorulma deneyleri arasında iki tane daha 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.

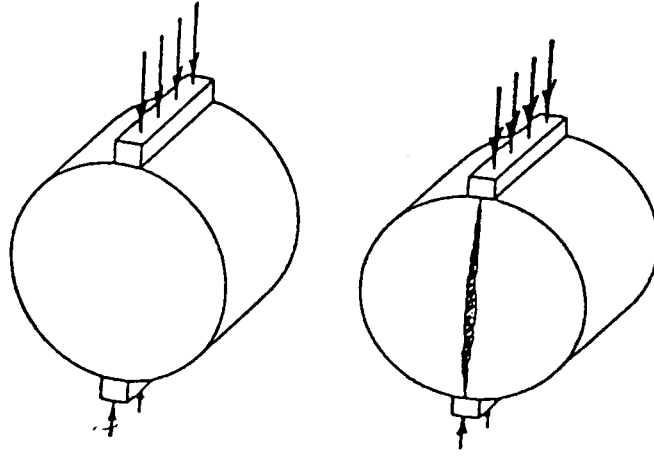
Bu farklılıklardan dolayı dairesel yorulma deneylerinde elde edilen yorulma ömrü eğilmeli deneylere nazaran daha kısadır.

3.3.5 Üç Eksenli Deney

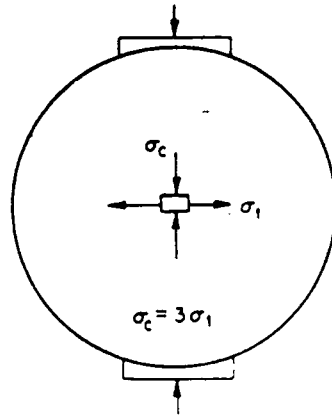
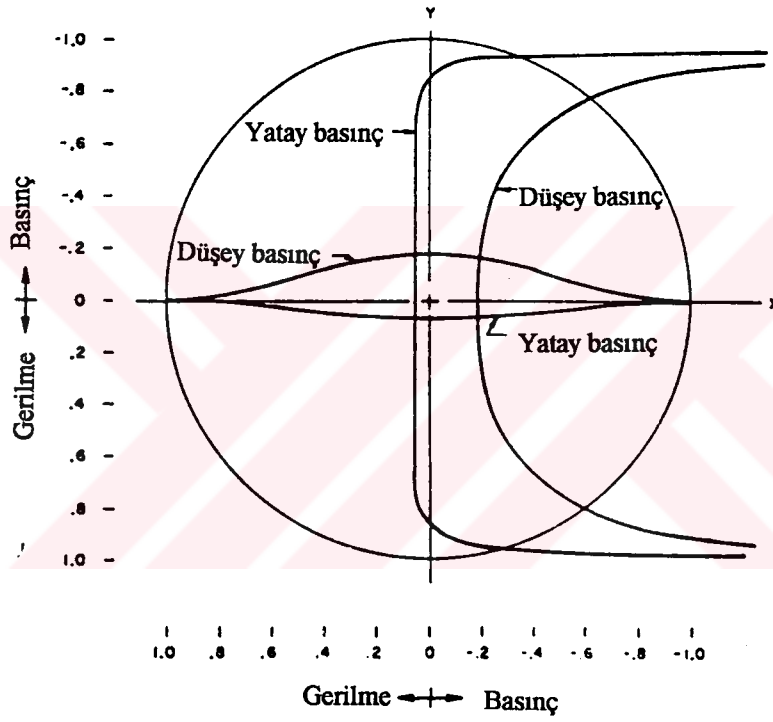
Bu tip yorulma deney ekipmanına örnek olacak olan bir tanesi Nottingham'da geliştirilmiştir. Bu ekipmana ait deney aleti Şekil 3.12'de verilmiştir (Pell vd., 1972 ve Cooper vd., 1975). Numuneler 4 in. çapında ve 8 in. yüksekliğindedir. Numuneler sinüzoidal olarak değişen eksenel gerilmeye maruz bırakılırlar. Bu ekipman gerilme sınırlandırılmalı ve sınırlandırmaz çekme-basınç deneyleri içinde kullanılmıştır.

Radyal ve eksenel gerilmelerin bağımsız olarak uygulandığı diğer bir üç eksenli tekrarlı yorulma deneyi de kullanılmıştır. Mc Lean (1974) de asfalt karışımlarının normal çekme ve basınç gerilmesi altında tekerlek izi oluşumu ile ilgili çalışmasında Şekil 3.13'de verilen bunun gibi bir deney ekipmanı kullanmıştır.

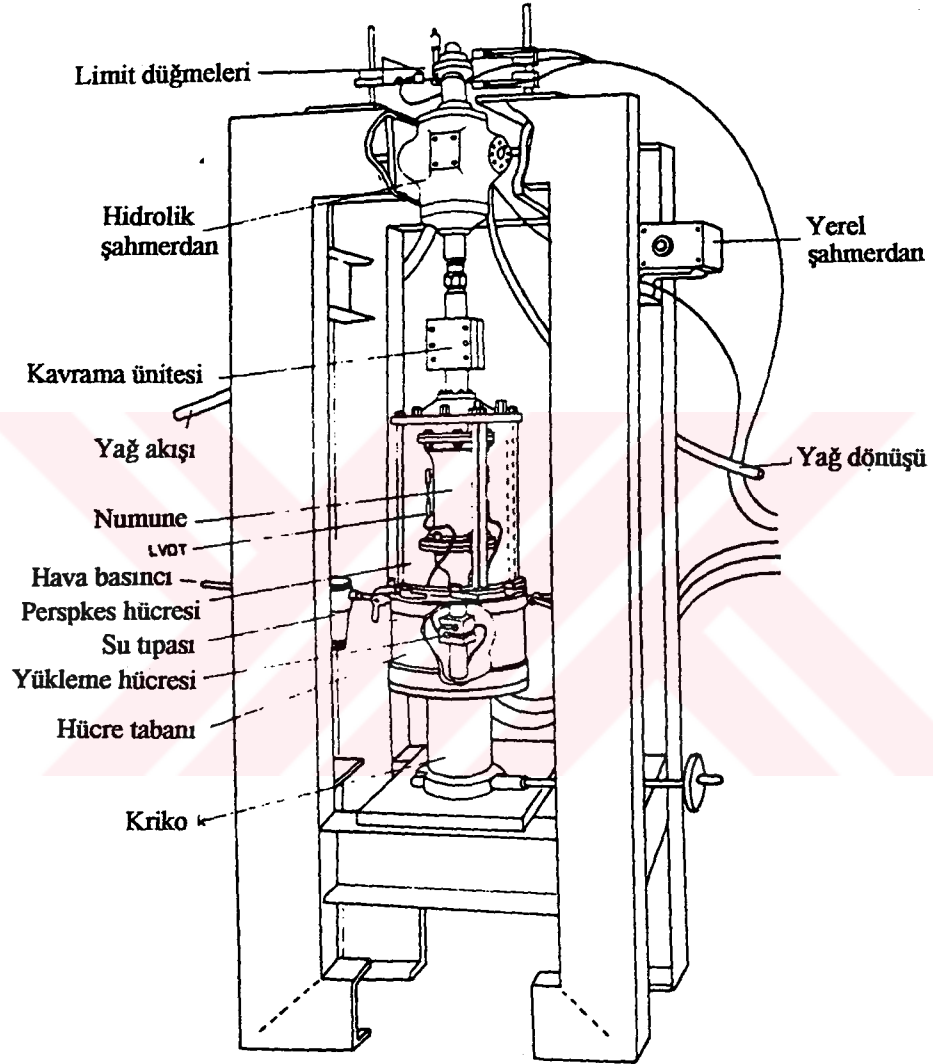
Bununla birlikte California'da içi boş silindir olarak üretilen numuneler üzerinde, dairesel gerilme ile birlikte dönmeli (tekrarlı ve sabit) kayma deformasyonu uygulayan deney ekipmanı geliştirilmiştir. Bu tarihte sadece kayma yorulması deneyleri uygulanmıştır. Daha sonraları; içi boş silindir içerisine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



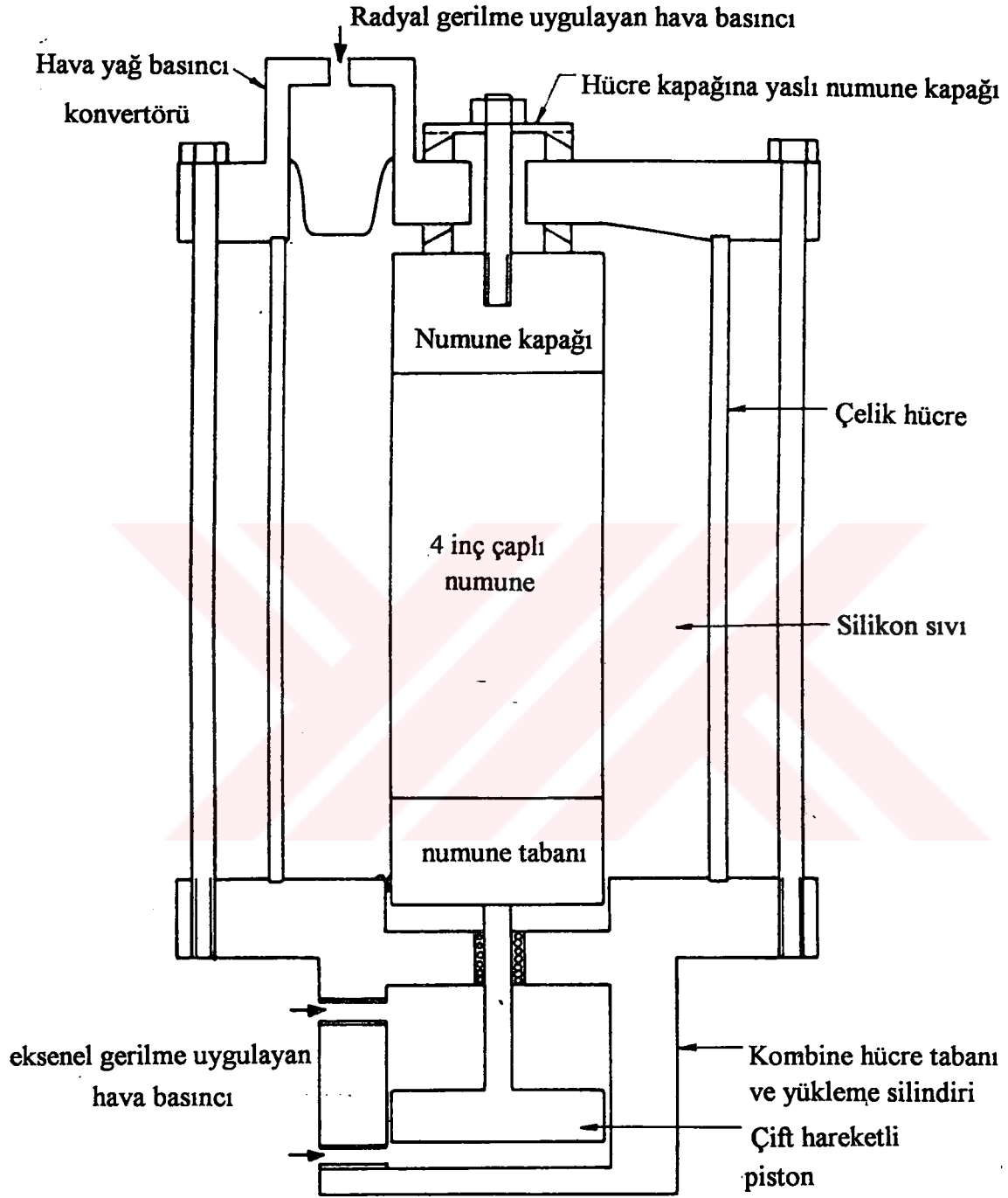
Şekil 3.10 Dairesel Yükleme Deneyi Konfigürasyonu ve Kırılma



Şekil 3.11 Dairesel Yükleme Deneyi Gerilme Dağılımı



Şekil 3.12 Üç Eksenli Yorulma Yükleme Deney Aleti



Şekil 3.13 Üç Eksenli Eksenel ve Radyal Yük Kontrollü Deney Aleti

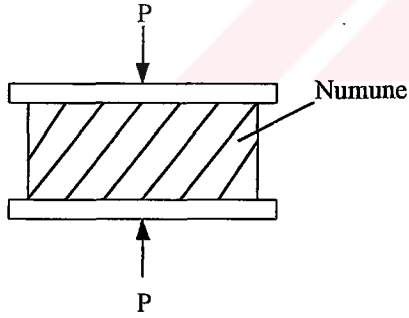
3.3.6 Dinamik Sünme Deneyi

Bilindiği üzere asfalt betonu karışımlarında tekerlek izi oluşumu genel olarak;

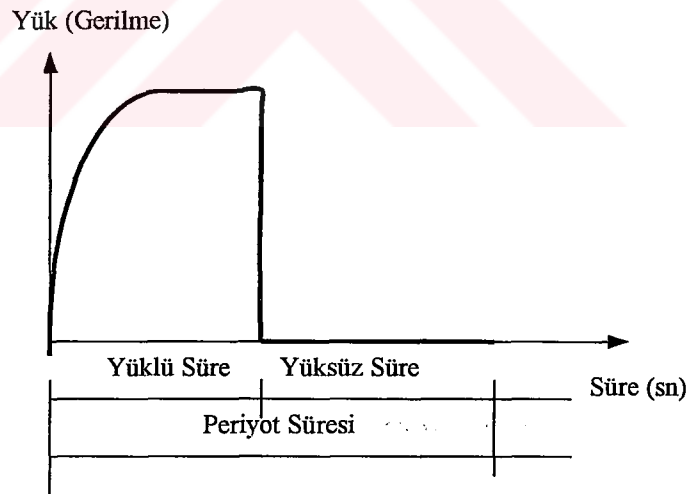
- Tek boyutlu yoğunlaşma (sıkışma) ve
- Plastik akmalardır.

Asfalt karışımlarının biçim değişimleri ve tekerlek izi oluşumları trafik altında oluşan sıkışmalardan daha ziyade, karışımın kayma mukavemetindeki kayıp ve kayma mukavemeti ile ilişkilidir. Ayrıca karışım tasarımında, arazide yapılacak uygulamanın mühendislik ve inşaa kurallarına uygun olarak yapılacağı düşünüldüğünden, trafik altında oluşacak olan yoğunlaşmalar dikkate alınmaz (NCHRP Report 338).

Bu deney, asfalt karışımlarının yukarıda açıklamaya çalıştığımız tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır (Alderson, 1995). Bu deneyde 10 veya 15 cm yarıçaplı silindirik numunelere Şekil 3.14’de verildiği şekilde tek eksenli basınç yükü Şekil 15’de gösterildiği şekilde tekrarlı olarak uygulanır.



Şekil 3.14 . Dinamik Sünme Deneyi

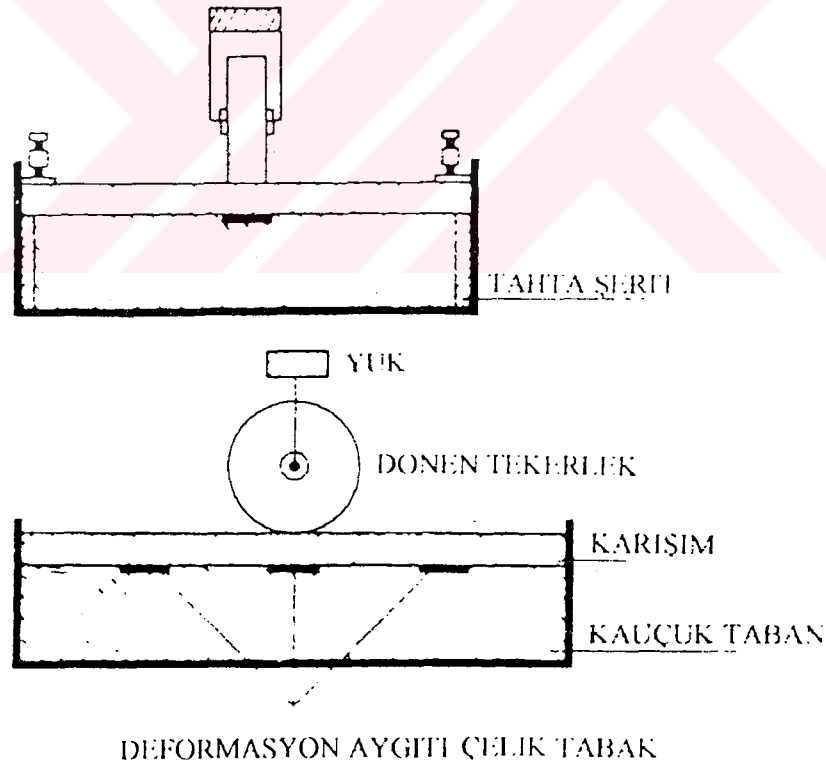


Şekil 3.15 Yükün Uygulama Şekli

3.3.7 Tekerlek İzi Oluşumu Deneyleri

3.3.7.1 Tekerlek İzi Laboratuvar Deneyi

Üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerleğin etkisini daha iyi belirlemek, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini daha iyi anlatmak amacı ve asfalt plakların yorulma karakteristiklerini araştırmak için Tekerlek-İzi deneyi geliştirilmiştir (van Dijk, 1975) (Şekil 3.16). Bu deney aletinde hava basınçlı ve yüklü bir tekerlek bir asfalt betonu plak üzerinde ileri ve geri yuvarlanır. 0,25 m yarıçapındaki tekerlek 0,60 m uzunlukta ve 0,05 – 0,07 m aralıklı bir genişlikteki yol üzerinde yuvarlanır. Plak bir lastik yatak üzerine desteklenmiştir. Tekerlek değme alanı yük veya tekerleğin şişkinliğinin değişimine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Uygun ekipmanlar ile ana karakteristikler olan plağın tabanındaki deformasyonlar ve çatlağın başlangıcı ve ilerlemesi tespit edilir.



Şekil 3.16 Tekerlek İzi Deneyi

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 40 mm kalınlıktadır. Tekerleğin değme alanı yaklaşık 25 cm²'dir) bulunan bilgiler van Dijk tarafından sunulmuştur. van Dijk kontrollü-gerilme ve kontrollü-deformasyon şartları altında ölçülen yorulma ömürleri arasındaki farklılığı, kılcal çatlaklar ile gerçek çatlaklar arasındaki farklılıkları ile açıklamaktadır.

3.3.7.2 Gerçek Boyutlu Deneyler

Tam bir arazi benzetimi elde edebilmek amacıyla bu deney yöntemi geliştirilmiştir. Gerçek boyutlu deneyler, tekerleğin dairesel ve boyuna hareketine göre ikiye ayrılmaktadır. Çizelge 3.6'da 1993 yılı itibari ile gerçek boyutlu deney alanları, kurulduğu yıllar ve yatırım maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 Gerçek Boyutlu Deney Alanları ve Maliyetleri (NCHRP Synthesis 235)

İsmi	Bulunduğu Yer	Kuruluş Yılı	Yatırım Maliyeti (\$)
Dairesel Deney Yolları			
C-TIC	Saskatchewan	1978	400.000
CAPTIF	New Zeland	1987	300.000
ISETH	Switzerland	1979	750.000
IUT	Illinois	1963	
JHPC	Japan	1979	
LCPC	France	1978	5.000.000
RRT	Romaña	1982	420.000
Shell	Netherlands	1967	
S-KSD	Slovakia	1994	
UCF	Florida	1988	250.000
UNAM	Mexico	1970	480.000
WSU	Washington	1965	

Boyuna Deney Yolları			
ALF	Australia	1984	1.000.000
FHWA-PTF	Washington	1986	1.100.000
RIOH-ALF	China	1990	1.000.000
PRF-LA	Lousiana	1995	1.800.000
DRTM	Denmark	1973	200.000
EPFL	Switzerland	1977	
HVS	South Africa	1971	
CAL-APT	California	1994	1.700.000
LINTRACK	Netherlands	1991	1.000.000
Minne-ALF	Minnesota	1990	200.000
PTF	United Kingdom	1984	1.700.000
INDOT/PURDUE	Indiana	1992	140.000
TxMLS	Texas	1995	2.500.000
CEDEX	Spain	1987	2.100.000

Dairesel yollarda, yüklerin gerçek şartlara uygun olarak uygulanabilmesi için eksantirik olarak hareket edeceği varsayılmıştır. Bu deneylerden dairesel olanlarına örnek olarak Fransızların deney yolu LCPC Şekil 3.16 ve boyunaya örnek olarak ise TxMLS Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17 Gerçek Boyutlu Deney (Dairesel)



Şekil 3.18 Gerçek Boyutlu Deney (Boyuna)

3.3.8 Deney Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Aşağıda sıralanan kriterler gözönüne alınarak deneylerin tercih edilme oranları tespit edilmiştir.

1. Arazi şartlarına benzetme,
2. Deney sonuçlarının uygulanabilirliği,
3. Basitliği ve
4. Arazi korelasyonudur.

Arazi şartlarına uygunluğu değerlendirmek için aşağıdaki sıralama izlenmiştir.

1. Numuneler ve yük, arazideki durumu ve karakteristikleri ne derecede uygun kılıyor?
2. Geniş bir sıcaklık aralığında parametrelerin ölçümü ne derecede önemli ve güvenli olarak yapılmaktadır?
3. Yük frekansı ve dinlenme periyotları arazideki şartlara ne derecede yakındır?

Deney yöntemlerinin basitliğine aşağıdaki ölçütlere 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 tasarımı için ölçülen parametre sayısı.
5. Aynı veya diğer bir ekipmanla ölçülmesi için gerekli parametre sayısı.

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

Bu çalışmada yer alan her bir deney için avantaj, dezavantaj ve sınırlamalarına ait bir zet izelge 3.7’de verilmiştir. Bu metotlar daha önce sıralanan kriterlere göre değerlendirilmiştir. Arazi korelasyonu için gerekli bilgiler bulunamamıştır, bundan dolayı da bu faktör değerlendirmede göz önüne alınmamıştır.



Çizelge 3.7 Deney metotlarının değerlendirilmesi (J. Matthews vd., 1993)

Deney Yöntemi	Deneyin Uygulanabilirliği ve Veriler	Yararları	Sakıncaları ve Sınırlamalar	Arazi Şartlarına Uygunluk	Basitlik	Genel Sıralama
Tekrarlı Eğilme	σ_b veya ϵ_b , Smix	1. İyi bilinen bir deney olması 2. Temel tekniklerin kullanılması 3. Sonuçların tasarımında doğrudan kullanılması 4. Deformasyon veya gerilme kontrollü seçeneklerinin olması	Özel ekipmana ihtiyaç duyulmakta ve deneylerin uzun sürmesi	4	4	1
Doğrudan Çekme	σ_b veya ϵ_b , Smix	1. İlave bir yorulma deneyi yapılmasına gerek yok olması 2. Yorulma deneyleri ile bir korelasyonun mevcut olması	LCPC yönteminde; 1. Korelasyon için 1 milyon tekrerrür esas alınmıştır. 2. Sadece 10 °C sıcaklıkta yapılması	9	1	1
Dairesel Tekrarlı Yükleme	4 σ_b ve Smix	1. Basitliği 2. Aynı ekipmanın farklı deneylerde kullanılması 3. Çatlamanın tahmin edilmesi	1. İki eksenli gerilme durumu 2. Yorulma ömrünün tahminindeki düşüklük	6	2	2
Harcanan Enerji Yöntemi	ϕ , Ψ , Smix ve σ_b veya ϵ_b	1. Fiziksel olayları esas alması 2. Harcana enerji ve N arasındaki ilişki	1. Kabuller için yoğun yorulma deneylerine gerek olması 2. Basitleştirilmiş prosedürlerin sadece yorulmanın büyüklüğü hakkında genel bir fikir vermesi	5	5	3

Bozulma Mekanizması	K_1 , K_2 ve Smix	1. Düşük sıcaklıklar için güçlü bir teori 2. Prensip olarak yorulma deneylerinin uygulanmasına ihtiyaç olamaması	1. Yüksek ısılarda K_1 bir malzeme olmamaktadır. 2. Çok fazla deney bilgisine ihtiyaç var K_1 ve K_2 arasındaki yorulma modelinin kurulmasında K_2 (kayma modu) 'ye ihtiyaç olması	7	8	4
Tekrarlı Çekme Veya Çekme-Basınç	σ_b veya ϵ_b ve Smix	1. Eğilmeli yorulma deneyinin yapılmasına gerek olmaması	1. Doğrudan çekme deneyine oranla zaman alıcı, pahalı ve özel ekipmana ihtiyaç olması	8	3	5
Üç Eksenli Tekrarlı Çekme-Basınç	σ_b , σ_c , Smix	1. Arazi şartlarını daha iyi temsil etmesi	1. Pahalı, zaman alıcı ve özel ekipmana ihtiyaç var 2. Kayma deformasyonu bilgilerine ihtiyaç olması	2	6	6
Elastik Temelli Tekrarlı Eğilme	σ_b veya ϵ_b , Smix	1. Arazi şartlarını daha iyi temsil etmesi 2. Yüksek ısılarda uygulanabilmesi	1. Pahalı, zaman alıcı ve özel ekipmana ihtiyaç var	3	7	7
Tekerlek İzi (Laboratuvar)	σ_b veya ϵ_b	1. Arazi şartlarını iyi derecede benzetmesi	1. Düşük Smix değerlerine yorulma ömrü tekerlek izinden etkilenmektedir. 2. Özel ekipmana ihtiyaç vardır	1	9	8
Tekerlek İzi (arazi)	σ_b veya ϵ_b	1. Gerçek dingil yükleri altında yorulma ömrü tahmin edilmektedir.	1. Pahalı ve zaman alıcıdır. 2. Tek seferde ancak birkaç malzeme değerlendirilebilmektedir.3. Özel ekipmana gerek vardır	1	10	9

4. NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ VE KARIŞIM DEĞİŞKENLERİNİN YORULMA DİRENİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Numune Hazırlama Yönteminin Etkisi

Numune üretim yöntemindeki birinci amaç, arazi şartlarında üretilen ve serilirken sıkıştırılan asfalt karışımlarını en iyi şekilde temsil edecek bir sıkıştırma yöntemi ile numuneleri hazırlamaktır. Yapılan sıkıştırmanın uygunluğu için agrega granülometrisi, boşluk oranı, asfaltla dolu boşluk oranı gibi ölçütler göz önüne alınır. Boşluklar karışımın mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinden dolayı önemlidir. Ayrıca karışımın sıkıştırma yöntemi karışımın içerisinde oluşacak olan kalıcı deformasyon için de önemli bir faktördür (J. Harvey vd., 1993).

Laboratuar ve arazide karışımın sıkıştırılabilirliği veya işlenebilirliğini etkileyen faktörler;

1. Agrega özellikleri,
2. Bitümlü bağlayıcının özellikleri
3. Asfalt karışımı özellikleri ve
4. Sıkıştırma sırasındaki performanslarıdır.

Agrega parçacıklarının şekli karışımın sıkıştırılabilme ve işlenebilme özelliklerini farklı derecelerde etkilemektedir. Agrega parçacıklarının yuvarlak olması durumunda agrega tanecikleri yükün uygulanması ile birbirleri üzerine kolaylıkla kayabilmekte ve yerleşmektedirler. Fakat köşeli agregalar, taneler arasındaki sürtünme dreniminin artması nedeniyle, yüke maruz kalmaları durumunda yerleşmeyē ve sıkışmaya karşı bir direnim göstermektedirler. Ayrıca yumuşak yüzey dokulu agregaların da işlenebilirlik dereceleri daha yüksek olmakta, sert yüzey dokulu agregalar ise köşeli agregalar için söylenen sebeplerden dolayı sıkışma ve yerleşmeye karşı bir direnim göstermektedirler.

Yüksek sıcaklık duyarlılığına sahip asfalt çimentolarının viskoziteleri sıcaklık değişimi ile birlikte sıcaklık duyarlılığı düşük olanlara göre daha hızlı bir şekilde değişmektedir. Ancak laboratuarda numunelerin karıştırılma ve sıkıştırılmalarının nisbeten kısa bir sürede yapılmasından dolayı sıcaklık değişiminin işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirlik üstündeki etkisi oldukça az olmaktadır. Bunun yanında karışımın arazideki serme ve sıkıştırma çalışmalarının uzun zaman alması nedeniyle, arazide yapılan uygulamalarda bu etki daha büyük önem taşımaktadır.

Düşük asfalt içeriği agreganın yüzeyinde oluşan kayganlığı azaltmakta ve karışımın sıkışabilirliği daha düşük olmaktadır. Ayrıca yüksek asfalt oranı, istenilen düzeyde sıkışma elde edilmemesine rağmen karışımın işlenebilirliğini önemli miktarda artırmaktadır. Laboratuarda karışım hazırlanması aşamasında, numunelerin sınırlı bir kalıp içerisinde sıkıştırılmasından dolayı istenilen sıkışmanın elde edilmemesi problemi ile karşılaşmamaktadır. Laboratuar karışımlarında asfalt muhtevasının yüksek olması agrega parçacıklarının bağlayıcılığını artırmakta ve boşluk miktarının az olmasını sağlamakta ancak karışımın birim hacim ağırlığı düşük çıkmaktadır.

Numunelerin üretiminde kullanılan sıkıştırma metotları;

1. Statik sıkıştırma,
2. Vurmalı sıkıştırma (impact),
3. Yoğurmalı sıkıştırma (kneading),
4. Dönen sıkıştırma (gyratory) ve
5. Tekerlek ile sıkıştırma (wheel-tracking).

4.1.1 Statik Sıkıştırma

Sıkışmamış asfalt karışımın, istenen boyutta 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 metot ASTM D-1074’de de iki taraflı sıkıştırma işlemi olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemin yoğurmalı, dönen ve tekerlek-yol metotlarına göre üstünlüğü, basitliğinden kaynaklanmaktadır (Omar

A.H. vd., 1994). Ana dezavantajı, agrega dağılımının araziye oranla farklı olması ve bu nedenle de arazi şartlarını tam olarak temsil etmemektedir.

4.1.2 Vurmalı Sıkıştırma

Bu yöntemde, karışımın üzerine sabit yükseklikten serbest olarak bırakılan belirli bir ağırlığın tekrarlı olarak düşürülmesiyle numune sıkıştırılmaktadır. Ağırlığın (çekicin) düşme sayısı silindir ve trafik altında meydana gelecek olan sıkışmayı sağlayacak şekilde seçilir.

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

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

Diğer bir sakıncası ise, tekrarlı etki ile sıkıştırmada hazırlanan numuneler belirli bir yıl sonunda lastik tekerleğin 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 deney numunelerinin elde edilmesi zorluğudur.

4.1.3 Yoğurmalı Sıkıştırma

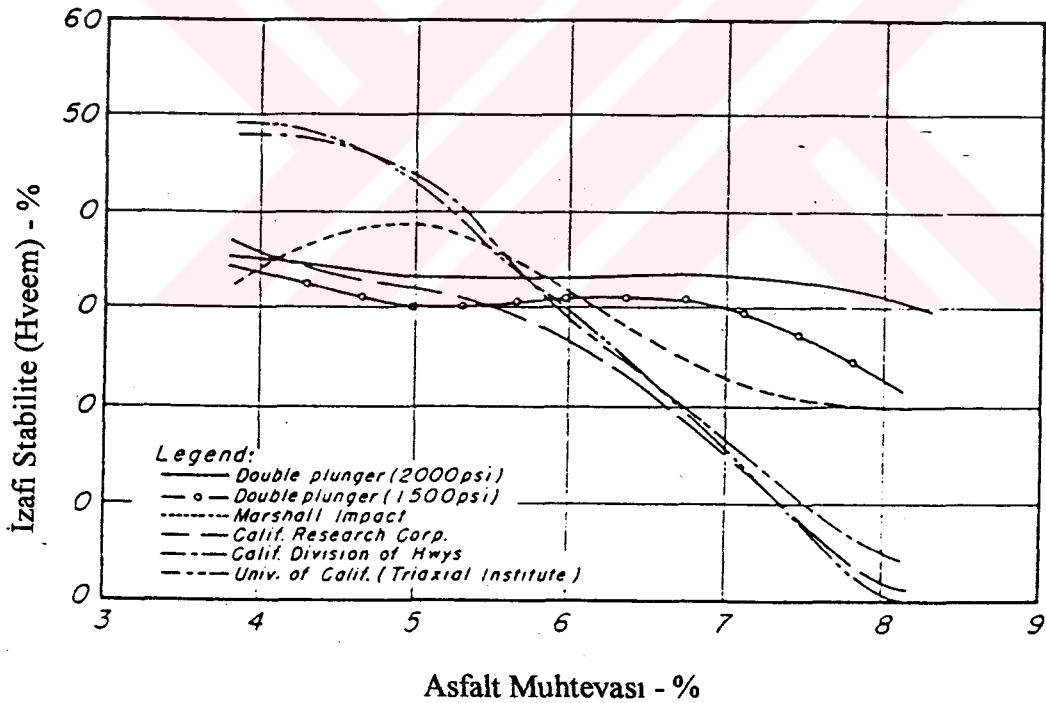
Yoğurmalı sıkıştırma, Triaxial Institue nin himayesi altında University of California, Berkeley ve California Division of Highways'in bir araya gelmesi ile geliştirilmiştir.

Sıkıştırma işlemi sıkışmış numune boyutundan oldukça küçük bir sıkıştırma yağı yardımıyla yapılmaktadır. Sıkıştırma yağının her bir yüklemeinden sonra yük kademeli olarak artırılıp belirli bir süre sabit bırakıldıktan sonra kesilmektedir. Her bir yüklemenin ardından numunenin yüzeyinde bir patlama oluşmaktadır. Bu metot da yükün sebep olduğu

deformasyon ve parçacıkların yönelimi araziden alınan numunelere benzerdir. Bu deney (ASTM D-3202) için kiriş numunelerin hazırlanması ve stabilometre deneyleri (CALTRANS Test 366) için de numune hazırlanması mümkündür.

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.

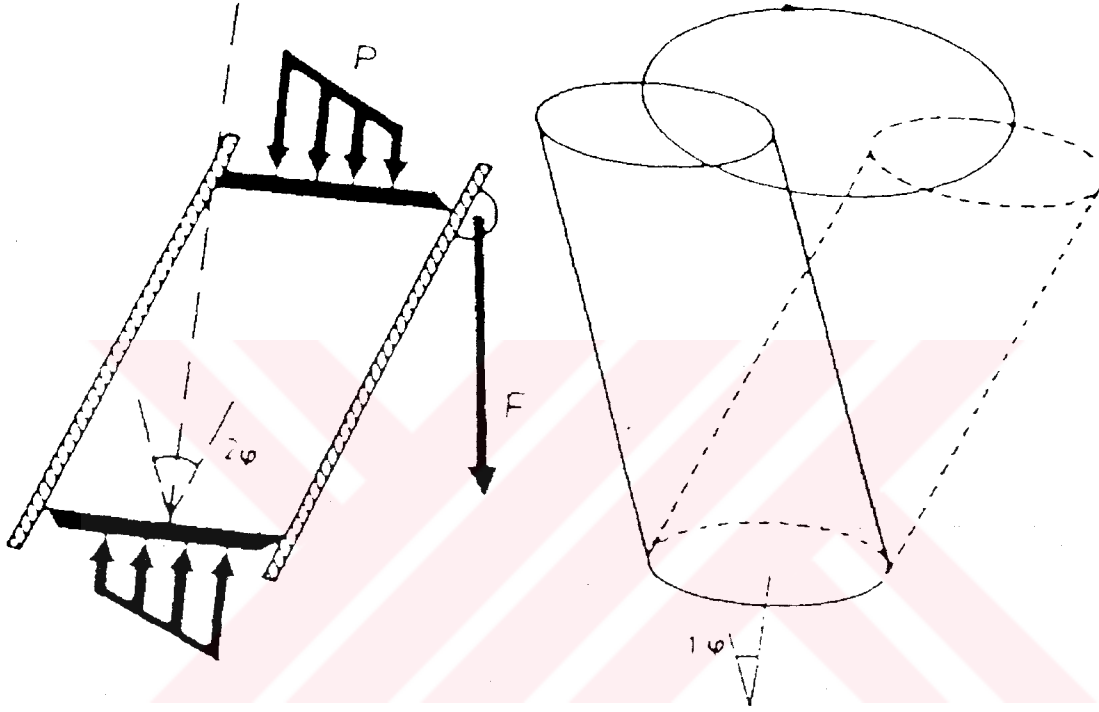
Şekil 4.1'de vurmali, statik ve yoğurmalı sıkıştırma yöntemleri ile hazırlanan numuneler üzerine yapılan Hveem Stabilometre deney sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi yoğurmalı sıkıştırma ile hazırlanan numunelerin asfalt muhtevası ile stabilitenin değişiminin hassasiyetinde mantıklı sonuçlar veren karışımların üretildiği görülmektedir.



Şekil 4.1 Sıkıştırma Yönteminin İzafi Karışım Stabilitesine Oranı

4.1.4 Dönel Sıkıştırma

Silindirik bir kalıp içerisinde dönme hareketına maruz bırakılan numune, iki paralel silindir aracılığı ile sabit basınç uygulanarak sıkıştırılır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Dönerek sıkıştırma çalışma prensibi

Ana sakıncası, deney numunelerinin diğer silindirik şekillerden farklı olan numunelerin imalinin yetersizliğidir. NCHRP/AAMAS çalışması dönen 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 tekerlek-yol sıkıştırma metotlarının her ikisi de araziye yeterli düzeyde temsil etmektedirler.

4.1.5 Silindirik Tekerlek Sıkıştırması

Tekerlek ile sıkıştırma, hemen hemen arazi ile aynı sıkıştırma durumudur (van Quantis vd., 1988; Bonnot, 1986; ve van Dijk, 1975). Bu tekniğin ana avantajı agrega parçacıklarının yöneliminin ve karışımın yoğunluğunun arazideki sıkıştırma ile çok yakın olabilmesidir. Büyük ölçekli çalışma için gerçek boyutta karıştırma yapılmalıdır. Bu yöntemin sakıncası, yüksek maliyetli özel ekipmanlara ihtiyaç göstermesidir.

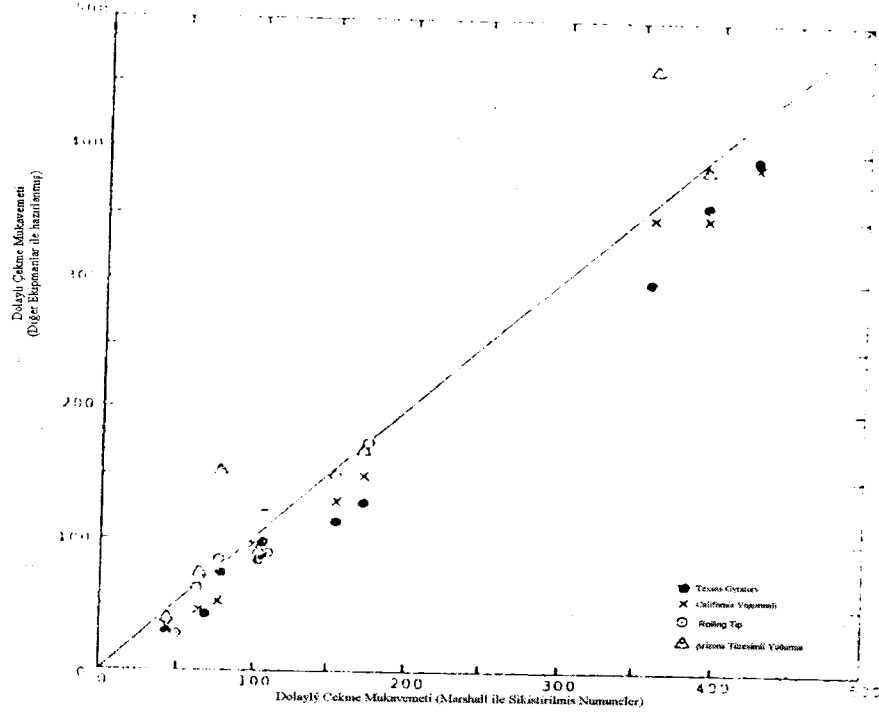
Alternatif olarak diğer daha küçük sıkıştırma metotları olan bir çelik silindir (Brown ve Cooper, 1984; van Quantis vd., 1988) veya hava basınçlı lastik tekerlekte (Bonnot, 1986) değerlendirilebilir. Buna örnek olarak Laboratoria Central des Ponts et Chausees (LCPC) tarafından geliştirilen ve 100 mm kalınlık, 500 mm'ye 180 mm boyutlarında kabuk numuneleri sıkıştıran tekerlek-yol verilebilir. Yol metal çerçeveli ve çelik bir levha üzerine yerleştirilir. Sıkıştırma tekerlekleri (400 mm * 8 mm) arazideki sıkıştırmaya temsil edecek şekilde hava basıncına ve yüke sahip olacak şekilde düzenlenmiştir.

4.1.6 Numune Hazırlama Metotlarına Ait Değerlendirme

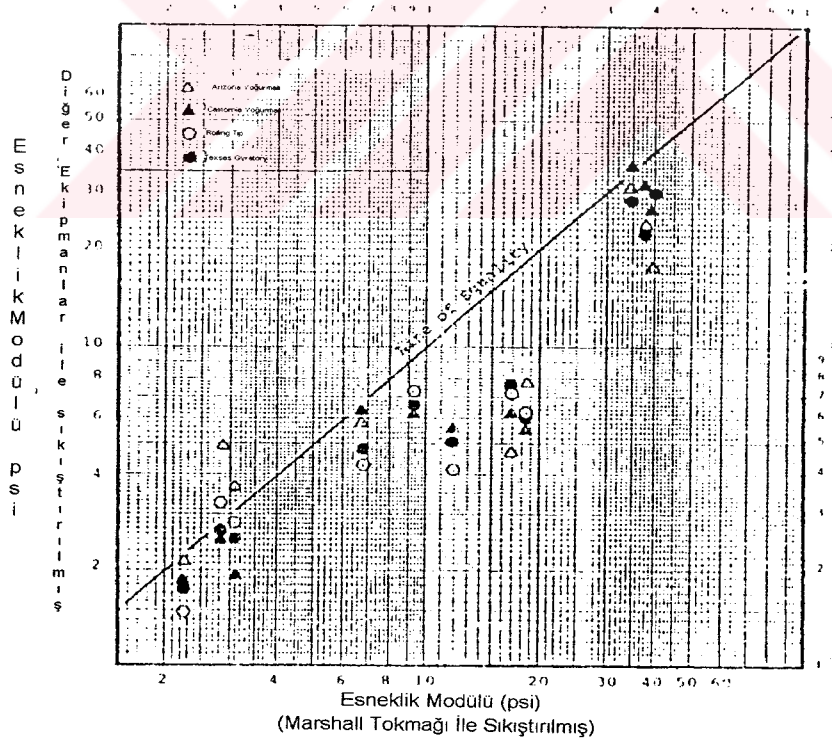
Sıkıştırma metotlarının araziden alınan karotlara yapılan deneyler ile benzer sonuçları vermeleri açısından yapılan sıralama;

1. Dönmeli sıkıştırma (Gyratory-Shear Compaction),
2. California yoğurmalı (Kneading) sıkıştırma,
3. Taşınabilir çelik Tekerlek Simulatörü,
4. Arizona titreşimli yoğurma sıkıştırması
5. Marshall tokmağı şeklinde olmaktadır.

Sıkıştırma yönteminin karışımın Marshall Yöntemi baz alınarak Dolaylı Çekme Mukavemeti üzerinde olan etkisi Şekil 4.3'de, Esneklik Modülü için ise Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3 Farklı Sıkıştırma Ekipmanları ile sıkıştırılan numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Değerlerinin Karşılaştırılması (AAMAS, 1992)



Şekil 4.4 Farklı Sıkıştırma Ekipmanları ile sıkıştırılan numunelerin Esneklik Modülü Değerlerinin Karşılaştırılması (AAMAS, 1992)

Ayrıca Sıkıştırma işlemlerinin değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

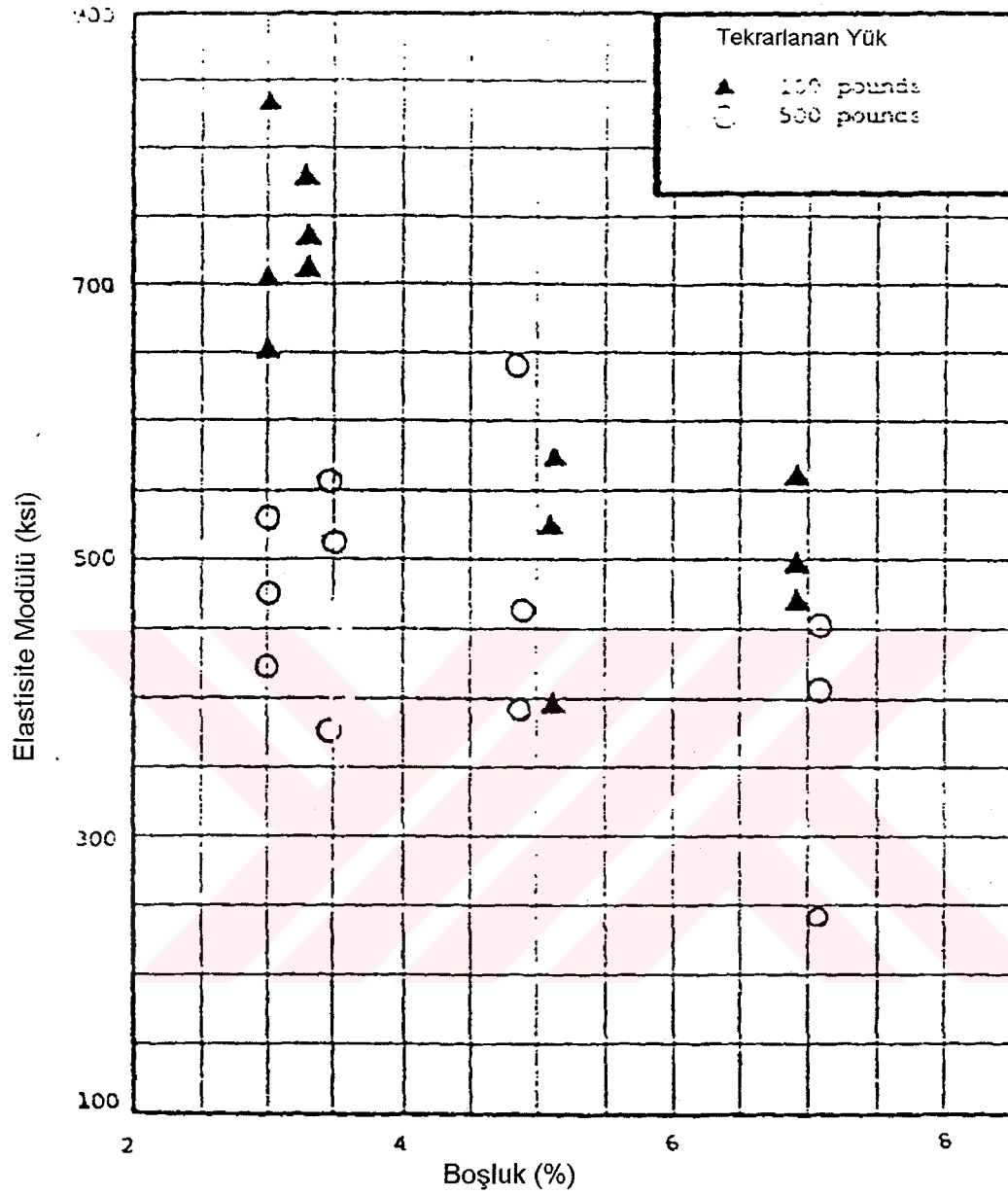
1. Silindir-tekerlek, yoğurmalı ve dönen sıkıştırma metotlarında numuneler statik ve vurmalı sıkıştırmaya göre arazi şartlarına daha uygun üretilmektedir.
2. Yoğurmalı Sıkıştırma asfalt muhtevasının belirlenmesine stabilitenin bulunmasında en büyük duyarlılığa sahiptir. Dönen ve tekerlek-yol sıkıştırma metotları için bunu saptamak çok zordur.
3. Sıkıştırma yöntemlerinin yorulma üzerindeki etkisi ile ilgili olarak herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Eğer böyle bir çalışma yapılacak olursa silindir-tekerlek, yoğurmalı ve dönen sıkıştırma metotları ile hazırlanan numuneler kullanılarak, sıkıştırma yönteminin yorulma üzerindeki etkisi tesbit edilmelidir. Deney numuneleri arazi koşullarını iyi bir şekilde modelleyecek şekilde seçilmelidir.

4.2 Karışım Değişkenlerinin Yorulma Direnimi Üzerine Olan Etkisi

Karışım değişkenleri asfalt betonu karışımının yorulma ve rijitliği gibi özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler. Aşağıda bu etkiyle ilgili olarak yapılan kaynak araştırmalarından elde edilen bilgiler özet olarak verilecektir.

Sıkıştırma yöntemi (dönel, tekerlek ve yoğurmalı) kalıcı deformasyon üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Filler miktarının %3 azaltılması, karışımın yorulma ve kalıcı deformasyon performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, yorulma performansını önemli oranda etkilemektedir.(J. Harvey v.d., 1993)

Karışımın boşluk yüzdesine bağlı olarak, Esneklik Modülünün değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi boşluk yüzdesindeki düşme modül değerini artırmaktadır (G. Y. Baladi v.d., 1989).



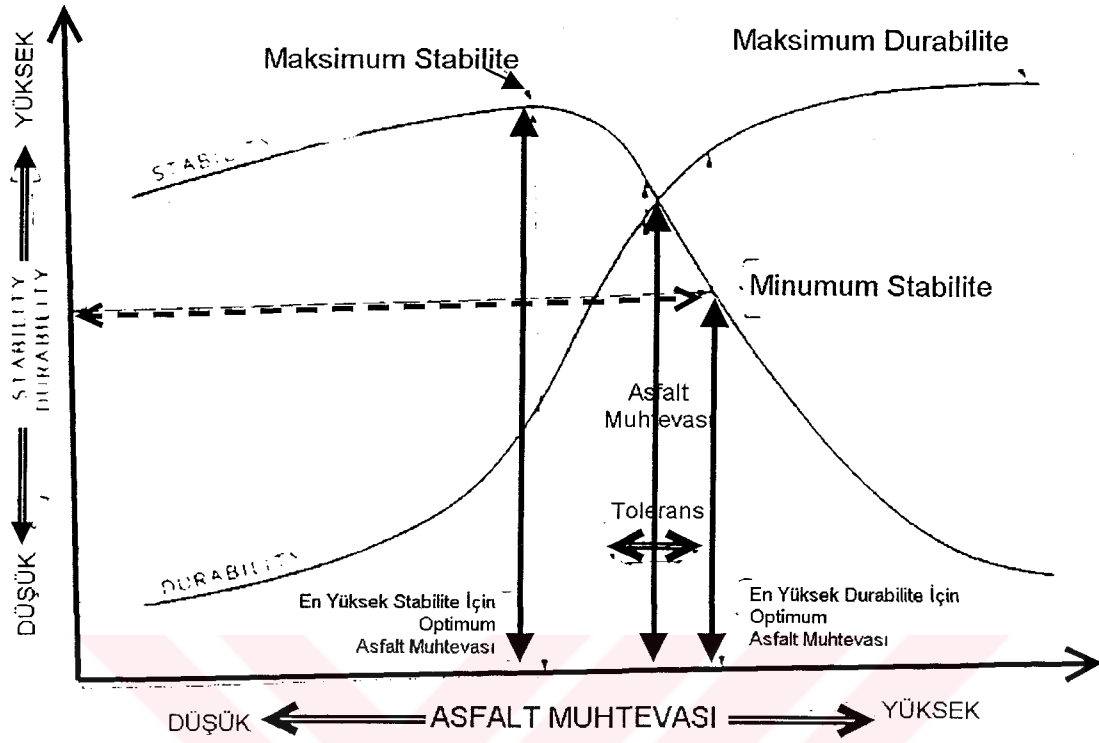
Şekil 4.5 Dolaylı Çekme Deneyinde Esneklik Modülünün Boşluk Yüzdesi ile Değişimi

Çizelge 4.1'de karışım değişkenlerinin kısaca tanımlamaları ve üzerinde etkili oldukları özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.1 Karışım Özellikleri(C. L. Monismith, vd.,1989)

Özellik	Tanım	Etkilendiği Karışım Değişkenleri
Rijitlik	$Smix(t,T)=\sigma/\epsilon$ Belirli bir sıcaklık ve yükleme süresinde gerilme ile deformasyon arasındaki ilişki	Agrega gradasyonu Asfaltın rijitliği Sıkıştırma derecesi Su hassasiyeti Asfalt muhtevası
Stabilite	Kalıcı deformasyonlara karşı direnim (genellikle yüksek sıcaklık ve uzun yükleme süreli düşük Smix durumları için)	Agrega yüzey dokusu Agrega gradasyonu Asfaltın rijitliği Asfalt muhtevası Sıkıştırma derecesi Su hassasiyeti
Durabilite	Hava (hava ve su) ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı direnim	Asfalt muhtevası Agrega gradasyonu Sıkıştırma derecesi Su hassasiyeti
Yorulma Direnimi	Karışımın bozulmaksızın tekrarlı yükler karşısındaki eğilme kabiliyeti	Agrega gradasyonu Asfalt muhtevası Sıkıştırma derecesi Asfaltın rijitliği Su hassasiyeti
Bozulma Karakteristiği	Karışımın uygulanan çekme gerilmelerine karşı mukavemeti	Agrega gradasyonu Agrega tipi Asfalt muhtevası Sıkıştırma derecesi Asfaltın rijitliği Su hassasiyeti
Kayma Direnimi	Karışımın ıslak yol şartlarında teker ve asfalt betonu yüzey arasındaki sürtünme katsayısı	Agrega gradasyonu Agrega tipi Asfalt muhtevası Sıkıştırma derecesi Asfaltın rijitliği Su hassasiyeti
Geçirimsizlik	Karışımın su ve hava geçirimsizliği	Agrega gradasyonu Asfalt muhtevası Sıkıştırma derecesi

Ayrıca karışımların satabilite ve durabilite özelliklerine bağlı olarak optimum asfalt muhtevasının belirlenmesine ait bir grafik Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Asfalt muhtevasına bağlı olarak karışımların stabilite ve durabilite ilişkisi (C. L. Monismith, vd., 1989)

J. T. Harvey ve B. Tsi tarafından yapılan çalışmada, asfalt karışım tasarımında ilk amacın uygun yorulma ve durabilite karakteristiklerini sağlayan, stabilite bozulmasını en az eden bir asfalt oranı bulmak olduğu söylenmektedir. Yapmış oldukları çalışmada düşük boşluğun karışımın yorulma ve rijitliği üzerinde faydalı olduğu görülmüştür. Ayrıca kritik kayma gerilmelerinin tabandan uzak olduğu veya düşük sıcaklıklı çevreler gibi tekerlek izi oluşumunun kritik olmadığı kesimlerde, asfalt muhtevasında yapılacak olan artırımların karışımın yorulma ömrünün artırılması bakımından fizibil olacağı sonucu bulunmuştur (J. T. Harvey vd., 1996).

R. Kim vd. agreganın kalıcı deformasyon üzerinde olan etkisi ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmalarda, nominal maksimum agreg boyutunun sabit tutulup ince ve kaba agreg oranlarının değiştirilmesinin kalıcı deformasyonlar üzerinde büyük bir etkiye sahip

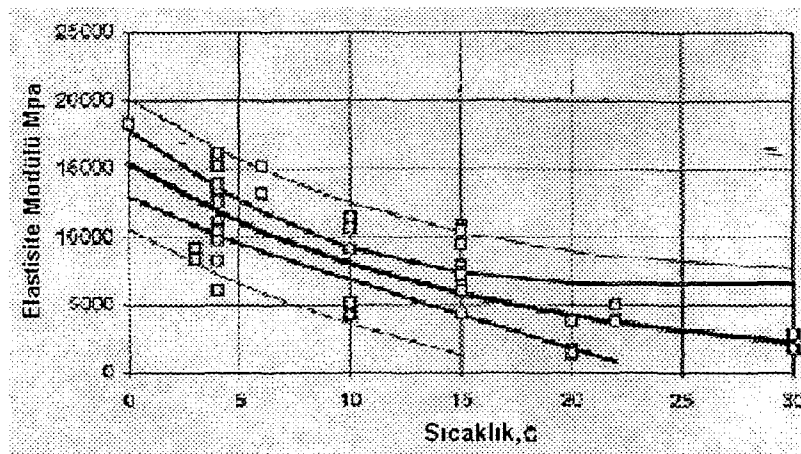
olmadığını görmüşlerdir (Y. R. Kim vd., 1992). Aynı şekilde J. M. Mathews ve C. L. Monismith tarafından yapılan çalışmadan iki önemli sonuç çıkartılmıştır. Bunlar;

1. Orta gradasyonlu agregalar tekerlek izi oluşumuna karşı kaba gradasyonlu agregalardan daha iyi performans sergilemektedir.
2. Sıcaklık, tekerlek izi oluşumunda agrega gradasyonundan daha etkili olmaktadır (J. M. Mathews vd., 1992)

T. Hsu ve K. Tseng tarafından yapılan çalışmada optimum asfalt muhtevastaki % 0,5'lik farklılığın asfalt karışımın yorulma direnimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır (T. Hsu vd., 1996).

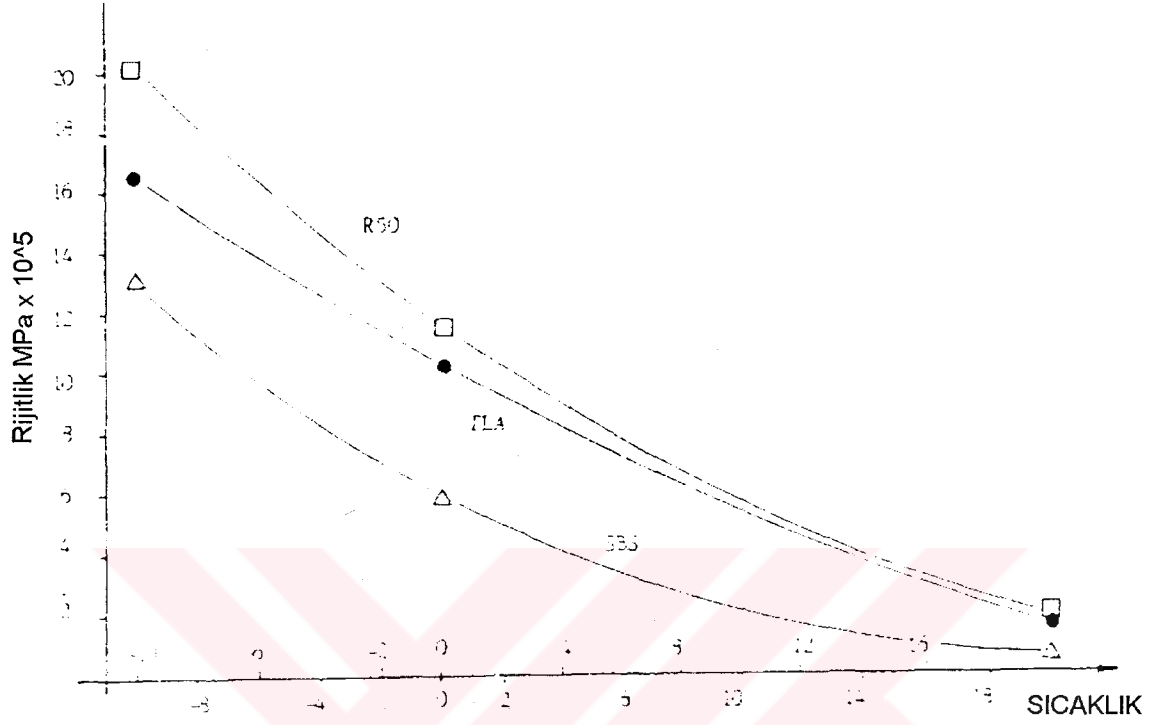
A.S. Adedimila ve T. W. Kennedy tarafından yapılan Tekrarlı Dolaylı Çekme deneylerinin sonucuna göre maksimum bir yorulma ömrüne karşılık bir optimum asfalt muhtevası değeri bulunmaktadır. Ayrıca bu optimum asfalt muhtevası değeri gerilme seviyesinin değiştirilmesinden de etkilenmemektedir. Optimum asfalt muhtevası değerini % 6-6,5 arasında değiştirmekte ve bu değer karışımın maksimum birim hacim ağırlığına karşılık gelen optimum bitüm muhtevası değerinden biraz daha az olmaktadır. (Adedimial vd., 1980).

F. S. Safwat araziden karot numuneler alarak bunlar üzerine Dolaylı Çekme Deneyi yapmıştır. Bu deney sonucunda sıcaklık ile elastisite modülü arasında Şekil 4.7'de verilen ilişkiyi bulmuştur.



Şekil 4.7 Sıcaklık Elastisite Modülü ilişkisi (Safwat, 1996)

Ayrıca S. J. Biczysko tarafından °C'nin altında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Sıcaklık Elastisite Modülü İlişkisi (Biczysko, 1990)

5. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, bitümlü karışımların performansı üzerinde etkili olabilen ölçütlere göre bir değerlendirme yapılmaktadır. Karayolu üstyapısında genel olarak karışım ve yapısal tasarım olmak üzere iki adet kavram bulunmaktadır. Yapısal tasarımda amaç, asfalt bağlayıcılı tabakanın tabanında oluşan ve asfalt betonu içerisinde çatlamlara sebep olan çekme gerilmelerine ve taban zemini üzerinde oluşan ve basınç deformasyonlarına dayanıklı bir üstyapı tasarım etmektir (Scung, 1993). Karışım tasarımındaki genel düşünce ise karışımın optimize edilmesi ve yapısal tasarım için gerekli dataları mantıklı ve doğru tahmin etmektir. Bu şekildeki değerlendirme yöntemlerinin matematiksel yöntemlerle desteklenmesi gerekmektedir.

Asfalt üstyapıların performansının ölçülmesi, çoğu çalışmada belirtilen üstyapıda oluşabilecek tehlikeli üç duruma göre değerlendirilmektedir. Bunlar;

1. Isıl çatlaklar: yüksek veya düşük sıcaklık çatlakları
2. Yorulma çatlakları,
3. Tekerlek izi veya kalıcı deformasyonlar'dır

Diğer bazı tehlikeli durumlar olan kopmalar, nemden ileri gelen bozulmalar, sürtünme katsayısındaki azalma gibi sürüş güvenliğini azaltacak bozulmalar da üstyapının bozulması açısından tehlikeli olabilir ancak bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar genelde bu üç tehlikeli durum için yapılmıştır. Tüm bunlara rağmen yük ve çevre şartları bakımından üstyapının performansı veya servis yeteneği indeksindeki azalma ;

- yorulma çatlakları
- ısı çatlakları
- kalıcı deformasyon ve
- nemden oluşan bozulma nedenleriyle de olmaktadır.

Asfaltın sertleşmesi veya yaşlanması üstyapı performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ayrıca yüzey bozulmaları, kopmalar, yüzey sürtünmesindeki azalma gibi etkenlerin de değerlendirilmesi üstyapı performansı açısından önemlidir.

Örneğin AASHO'da 20 °C (68 °F)'daki elastisite modülü ile karışım değerlendirilmektedir (AASHO, 1993) Ancak sadece bu değeri, karışımın stabilite, durabilite gibi özelliklerinin değerlendirilmesinde yeterli olmamaktadır ve ayrıca kesin bir sonucun elde edilebilirliği de kesinleştirilmelidir. Bu nedenle üstyapıda oluşan bozulma durumlarını değerlendirmek için farklı malzeme özellikleri ve deney şartları gereklidir.

Bu bölümde, asfalt betonu karışımlarının Yorulma ve Tekerlek İzi performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan bazı modeller ve sadeleştirmelere ait literatür bilgisi verilecektir.

5.1 Yorulma Dayanımı Modelleri

Çoğu tasarım ve değerlendirme yöntemi, uzun dönemli bozulmalar için prosedür olarak yorulma kırılmasını esas almaktadır. Daha önceden de bahsedildiği üzere, yorulma çatlaklarının gelişimi asfalt betonu tabakanın tabanında oluşan çekme gerilmeleri ile ilişkilidir (TRR, 1540).

Yorulma çatlağı bir gerilme olayı olarak göz önüne 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 çekme deformasyonları arasında, çekme gerilmesi ile olan korelasyonundan daha iyi korelasyonlar bulunmuştur. Yüksek korelasyon elde edilen bu ilişkide aşağıda verilmiştir.

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

N_f =Yorulma ömrü

ε_t =Uygulanan çekme deformasyonu

a,b =Laboratuar deneyleri ile belirlenmiş sabitler.

Bu denklem üstyapı tasarım 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;

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

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, tekerlek basınçları, aks yükleri ve tiplerinden dolayı farklılık göstererek yanıltıcı olabilmektedir. Buna göre karışık yüklerin bozucu etkilerini bir araya getirmek için bazı bağıntılara gerek vardır. Bu bağıntıların en yaygın olanı;

$$N_f = \frac{n_1}{N_{1f}} + \frac{n_2}{N_{2f}} + \dots + \frac{n_i}{N_{if}} + \dots + \frac{n_m}{N_{mf}} \quad \text{dır; burada:}$$

N_f = deformasyon tekerrür oranları toplamı

i =üstyapının kritik kesitinde i . seviyede uygulanan deformasyon

n_i = i . deformasyonun tekerrür sayısı

N_{if} = i seviyedeki deformasyonun, bozmaya sebep olan tekerrür sayısıdır.

Miner Hipotezi olarak adlandırılan lineer eşitlikte tekerrür oranlarının toplamının (N_f) bire ulaşması durumunda üstyapının bu karışık yük uygulaması altında bozulduğu kabul edilir.

Üstyapı sistemlerinin yorulma performansını tahmin edebilmek amacıyla, yukarıda verilen iki genel denklem esas alınarak çeşitli yorulma modelleri geliştirilmiştir.

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

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,39 \log V_B + 24,2 \log T_{RB} - 40,7 - \log N}{5,13 \log V_B + 8,63 \log T_{RB} - 158}$$

ε_t = Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu (μ)

N = Kırılmaya sebep olabilecek yükleme sayısı

V_B = Asfalt bağlayıcısının hacmi (%)

T_{RB} = Halka ve bilye yumuşama noktası, $^{\circ}\text{C}$

Shell ise yorulma deformasyonunu aşağıdaki bağıntı ile ifade etmiştir:

$$\varepsilon_t = (0,856 * V_B + 1,08) * S_{mix}^{-0,36} * N^{-0,2}$$

ε_t = Müsaade edilebilir eğilme deformasyonu (10^{-5})

N = Kırılmaya sebep olabilecek yükleme sayısı

V_B = Asfalt bağlayıcısının hacmi, (%)

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

Asfalt Enstitüsü tarafından ise aşağıda yer alan bağıntı bulunmuştur.

$$N = 18,4 * C * (4,325 * 10^{-3} * (\varepsilon_t)^{-3,291} (S_{mix})^{-0,854})$$

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

$$C = 10^M$$

$$M = 4,84 * \left[\frac{V_B}{V_B + V_V} - 0,69 \right]$$

Burada:

V_V = Hava boşluğu hacmi (%)

AAMAS'de ise ;

Yorulma sabitleri a ve b, esneklik modülü, dolaylı çekme mukavemeti gibi malzeme özellikleri ile ilişkilidir. Esneklik modülünden a ve b katsayılarının tespitine yönelik olarak geliştirilen model ise;

$$K_1 = K_{1R} * \left(\frac{E_R}{E_{Rr}}\right)^{-4}$$

$$n = 1,75 - 0,252 * \text{Log}K_1$$

K_{1R} =Referans Katsayı ($7,87*10^7$)

E_{Rr} =Referans elastisite modülü (500.000 psi)

E_R =Seçilen sıcaklık için elastisite modülü

Şeklindedir.

Bütün bu bağıntılarda asfaltın tüm özellikleri halka-bilye deneyindeki yumuşama noktasıyla veya asfalt rijitliği ile ifade edilmiştir. Bunun yanında bu bağıntıların sadece bir yaklaşım olduğu söylenebilir ve bu yöntemler üstyapı tasarımı ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmalıdır.

5.2 Tekerlek İzi Oluşumu Modelleri

Üstyapıda oluşan tekerlek izi tipleri;

- Tek boyutlu yoğunlaşma
- Asfaltta oluşan daha sonraki hareketler ve plastik akmlar

olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Asfalt betonu malzemelerinin biçim değişimi ve tekerlek izi oluşumları, trafik altında sıkışmadan daha ziyade karışımların kayma mukavemetindeki kayıp ve daha sonradan oluşan akma ile ilişkilidir. Laboratuarda bu olayın tanımlanması için çeşitli ekipmanlar geliştirilmiştir. Ancak bunların başarı oranları farklılık göstermekte veya değişken olmaktadır.

Yüksek boşluklu karışımlarda trafik sıkıştırması nedeniyle ortaya çıkabilecek tekerlek izi oluşumları dikkate alınmaz. Çünkü karışımın arazide uygulanmasının mühendislik ve inşaat şartlarına uygun olarak yapılacağı ve sıkıştırmanın başarılı olacağı düşünülür.

Asfalt betonu karışımların esneklikleri kullanılarak, tekerleğin hareket edeceği hat üzerinde oluşacak olan tekerlek izi veya kalıcı deformasyonun seviyesi “tekerlek izi oranı” denklemi ile tahmin edilebilir. Bu denklemlerden biri (Tompson, 1990);

$$RR = A * N^m \quad \text{‘dir. Burada;}$$

RR=Tekerlek izi oranı (veya numune yüksekliğindeki değişme)

N= Yükleme Tekerrür sayısı

A,m=Regrasyon katsayılarıdır.

Diğer bir yaklaşım ise;

$$\text{Log} \varepsilon_p = \text{Log} A + m * \text{Log} N \quad \text{‘dir. Burada da;}$$

ε_p =Toplam kalıcı deformasyon

N= Yükleme tekerrür sayısı

A,m=Regresyon katsayılarıdır.

Bu denklemde A ve m katsayıları Statik Sünme deneyi yardımıyla da bulunabilmektedir.

$$A = a * (t_1)^{m_c} - \varepsilon_{rt}$$

$$m = \frac{\text{Log} a + 3,5563 * m_c + \text{Log}(1 - X) - \text{Log}[a * (0,1)^{m_c} - \varepsilon_{rt}]}{4,5563}$$

m_c =Statik sünme eğrisinin doğru olduğu kesimdeki eğim

a=sünme-zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarı

t_1 = Yükleme süresi (sn)

ε_{rt} =Tekrarlı sünme deneylerinde oluşan toplam geriye dönen deformasyon

X=Geri dönme kabiliyetidir.

5.3 Karışım Performansının Değerlendirilmesinde Uygulanan Bazı Deneyler

Yukarıda sıralamış olduğumuz modellerde kullanılan parametrelerin bulunmasında uygulanan deneyler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

5.3.1 Bitümlü Karışımların Dolaylı Çekme Mukavemeti

Bu metot bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin tesbitini içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların ısı ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder.

Bu deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm muhtevasının belirlenmesinde kullanılır. Deney standardı olarak birimler inch ve pound olarak hesaplanır. Bu yazıda birimlerin yanında parantez içerisinde yer alan değerler diğer birim hakkında bilgi edinilmesi amacıyla verilmiştir.

- Deneyin Özeti

Silindirik asfalt numunesine yüke dik doğrultuda; sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır. Deney aşamasında bozulma uygulanan yükte bir artışın olmadığı veya en büyük yükün oluştuğu zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanım göstermiş olduğu en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır. Deney aşamasında yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmeler de tesbit edilir.

Önemi ve Kullanımı

Dolaylı çekme mukavemeti ve bozulma deformasyonu değerleri, üstyapı tasarımında ve bitümlü karışımın kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu deneyden elde edilen bu

değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir.

Tüm bu amaçlar ile bu deneyin uygulanmasının yanı sıra bitümlü karışımı oluşturan malzemelerin bir yol üstü yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği hakkında bilgi edinmek amacıyla yapılmaktadır.

Bu deneyde ekipman olarak Marshall Stabilitesi Deney Aleti ve Dolaylı Çekme Gerilmesi Deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanılır.

-Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilirler. Deneyde 4" (10 cm) çaplı numuneler kullanılıyor ise numune min 2" (5 cm) yüksekliğinde ve $D_{max} < 1"$ (2,5 cm) olmalıdır.

-Deneyin Yapılışı

-Numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tesbit edilir.

-Numuneler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenir. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat boyunca bekletildikten sonra deneye tabii tutulurlar.

-. Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.

- Ön hazırlık amacıyla numunelere yarı sinüzoidal yük uygulanır ve numunelerin yük doğrultusuna dik eksenleri işaretlenir.

- Ön hazırlık deney sonucunda yatay eksen boyunca oluşan deformasyonlar ölçülür ve numunelerin elastisite modülleri tesbit edilir.

- Deney esnasında yük,. deformasyon miktarı 25 °C sıcaklı ve daha üzerindeki sıcaklıklarda dakikada 2” (5 cm) ve 10 °C ve daha düşük sıcaklıklarda ise dakikada 0,05” ve 0,065” (1,27 ve 1,65 cm) olacak şekilde uygulanır.

- Deney esnasında numuneye uygulanan yük ve yatay ve düşey doğrultuda oluşan deformasyonlar yükleme zamanının tamamında kaydedilir. Yatay ve düşey deney ekipmanında bir bozulmanın oluşmaması için numunenin kırılmasından önce deneyin durdurulması önerilir.

-Hesaplamalar

$$St = \frac{Pf}{h} * 0,156$$

Dolaylı Çekme Mukavemeti St (psi)

Pf= Numunenin bozulduğu andaki yük (pound)

h= Numune yüksekliği (inch)

Poisson's Oranı γ

$$\gamma = \frac{DR * 0,0673 - 0,8954}{DR * (-0,2494) - 0,156}$$

$$DR = \frac{Yt}{Xt}$$

Yt= Düşey deformasyon

Xt= Yatay deformasyon

Elastisite Modülü (E)

$$E = \frac{Sh}{X_t} * (0,2692 + \gamma * 0,9974)$$

$$Sh = \frac{P}{X_t}$$

Çekme Deformasyonu ϵt (mikron)

$$\epsilon t = \Delta h * \left[\frac{0,03896 + \gamma * 0,1185}{0,0673 + \gamma * 0,2496} \right]$$

Δh =Toplam yatay deformasyon

Basınç Deformasyonu ϵc (mikron)

$$\epsilon c = \Delta v * \left[\frac{-0,1185 - \gamma * 0,03896}{-0,8954 + \gamma * 0,156} \right]$$

Δv =Toplam düşey deformasyon

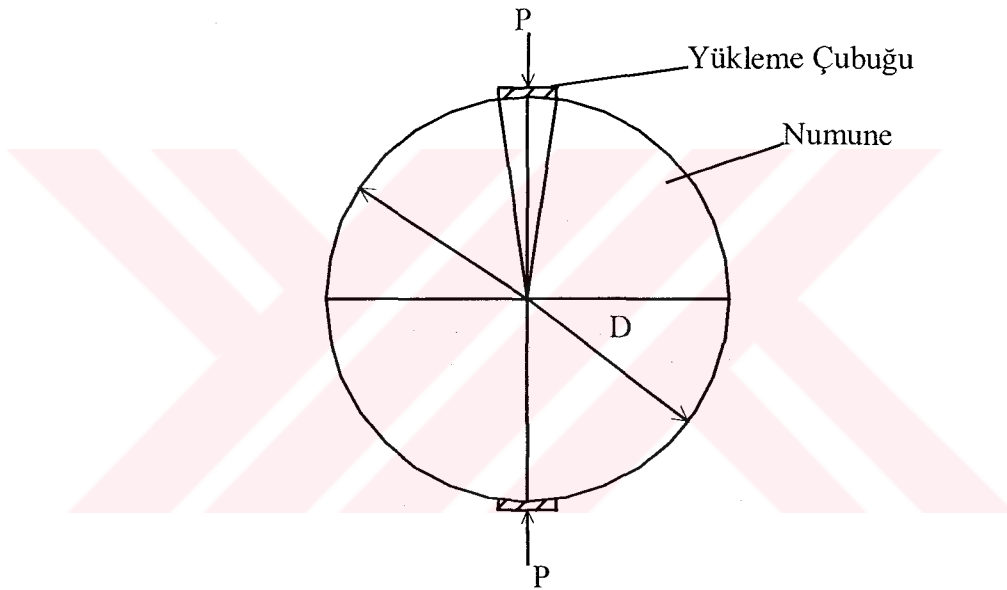
5.3.2 Bitümlü Karışımların Elastisite Modülü için Dolaylı Çekme Deneyi

Bu metotta amaç, tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuarda hazırlanmış veya karot numunelerinin elastisite modülü değerini tespit etmektir. Deney, farklı sıcaklıklar (5, 25, 40 °C) ve yükleme periyotları altında yapılmaktadır. Deneyde her bir sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait elastisite modülü değerleri belirlenir.

Elastisite modülü değerleri, malzemelerin relatif kalitesini değerlendirmesinin yanı sıra kaplama tasarımı, değerlendirme ve analizleri için girdi üretmeye yaramaktadır. Bu deney sayesinde sıcaklık, yükleme miktarı ve süresi gibi etkileri araştırılabilmektedir.

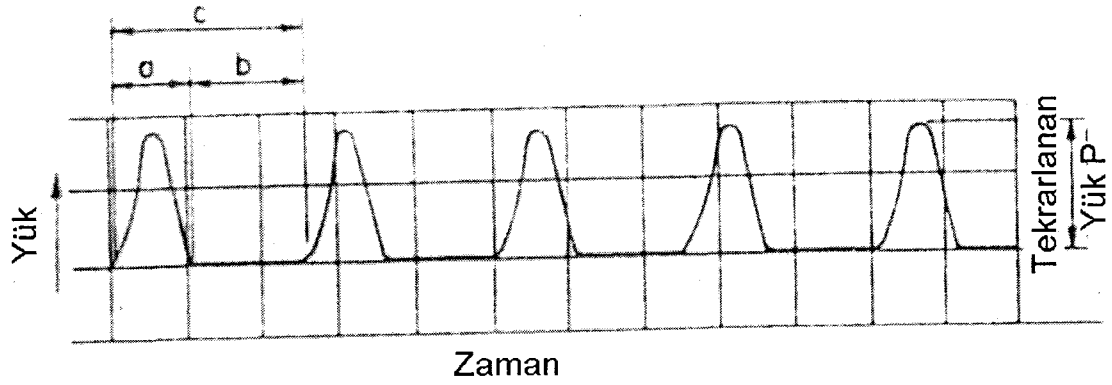
-Deneyin Özeti

Bitümlü karışımların dolaylı çekme gerilmesi deneyi ile elastisite modülü değerlerinin tesbit edilmesinde numunelere yarı sinüzoidal (haversin) bir formda basınç yükü uygulanması suretiyle yapılır. Yük, silindirik asfalt numunesi üzerine düşey olarak uygulanır (Şekil 5.1)



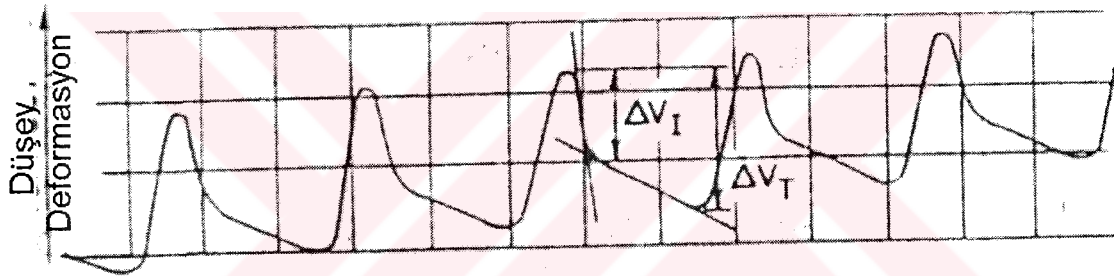
Şekil 5.1 Dolaylı Çekme Deneyi

Şekil 5.2 'de verilen süre-yük eğrisine uygun olarak yapılan deney sonucunda numunenin nihai yatay deformasyonu ölçülür ve bir poisson oranı kabul edilerek numunenin elastisite modülü hesaplanır.

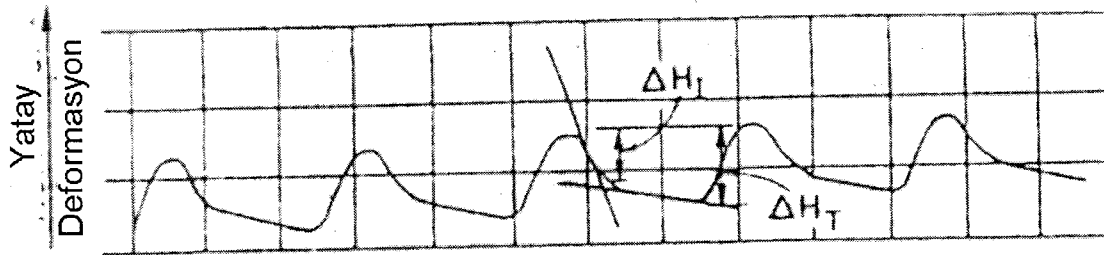


(a) Yük-Zaman

a = Yüklü Süre
 b = Yüksüz Süre
 c = Tekrar Süresi (Periyot)



(b) Düşey deformasyon - Süre ilişkisi



(c) Yatay deformasyon - Süre ilişkisi

Şekil 5.2. Yükün uygulanma ve deformasyon şekli

-Deneyin Yapılışı

-Numuneler sıcaklık kontrollü hücreye yerleştirilerek belirlenen sıcaklığa gelmesi için 24 saat beklenir. Numunelerin istenen sıcaklığa gelip gelmediği kukla numune içerisine yerleştirilen bir derece ile tespit edilir.

-Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.

-Ön hazırlık yüklemesi yapılarak numunenin yerleşmesi sağlanır.

-Numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin % 10'u ile 50'si arasında değişen bir yük belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarısinüzoidal (haversin) olarak uygulanır ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür.

-Deney aşamasında yük tekerrüründe 0,33, 0,5 ve 1 Hz'lik frekansların uygulanması önerilmektedir.

-Elastisite modülü değeri için bir numuneye iki defa deney uygulanır. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° döndürülerek ikinci kez deneye tabii tutulur ve elastisite modülü değeri olarak iki deney sonucunun ortalaması alınır.

-Deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden daha fazla deney yapılması imkanı vardır. Bu nedenle numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yük ile başlanmalıdır.

-Hesaplamalar

Her bir deney sonucu için Elastisite modülü değerleri, daha önceden de bahsedildiği şekilde;

$$E = \frac{P * (\nu + 0,27)}{h * \Delta h}$$

E=Elastisite Modülü Mpa)

P=Uygulanan yük (kN)

ν =Poisson oranı

h=numune yüksekliği (in.)

Δh =Geri dönen deformasyon

denklemleri ile hesaplanır.

5.3.3 Bitümlü Karışımların Sünme Modülü Deneyi

Bu deneyde yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerlerinin belirlenmesini içerir. Tek eksenli basınç deneyi asfalt betonu karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı direnimlerini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Bu deney yöntemi yoğun asfalt karışımlarına ve karot numunelerine uygulanabilir.

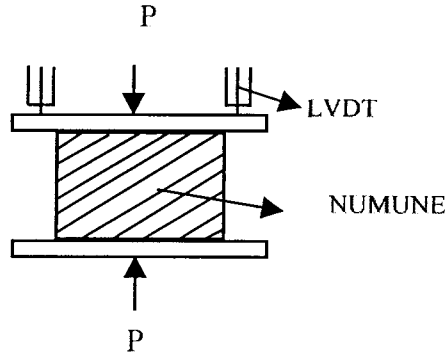
Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, elastik teori veya nonelastik teori yardımıyla ısı ve dingil yüklerine maruz bulunan asfalt betonu karışımların ,düşük sıcaklıklardaki çatlama potansiyeli veya tekerlek izinin hesaplanması ve rijitliğinin tahmininde kullanılabilir.

-Deneyin Özeti

A. Tek Eksenli Basınç;

Sabitlenmiş bir zaman boyunca, sabit büyüklükte bir yük, sıkıştırılmış silindirik numune üzerine uygulanır. Numunenin tek eksen boyunca deformasyonları ölçülür ve yükün üzerinde bulunduğu sürenin herhangi bir parçası için bir basınç sünme modülü hesaplanır.

Üzerine uygulanan yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon ölçülür. Şekil.5.3’de tek eksenli basınç deneyi verilmiştir.



Şekil.5.3 Tek Eksenli Basınç

B. Dolaylı Çekme;

Sabit bir yük, belirli bir zaman boyunca, Şekil 5.1’de gösterildiği şekilde numuneye numuneye uygulanır. Numunenin yatay deformasyonu ölçülür ve numunenin dolaylı çekme sünme modülü hesaplanır. Yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon ölçülür.

-Önemi ve Kullanımı

Sünme modülü değeri, numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir. Deney, sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı muhtevasının ve sünme yükleme zamanının etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir. Tek eksenli silindirik numuneler, bir basınca maruz bırakılarak veya bırakılmaksızın da test edilebilirler.

Sünme modülü , karışımın fiziksel özellikleri ile birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir ve ayrıca verilen bir trafik ve çevre şartları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir.

Deney esnasında gerekli ekipmanlar aşağıda sıralanmıştır.

- Eksenel yükleme ekipmanı
- Sıcaklık hücresi
- Deformasyon ölçüm ekipmanı
- Yük ölçüm ekipmanı
- Kayıt ekipmanı

-Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilirler. Deney numunelerinin minimum yüksekliği 6" (15 cm) olmalıdır.

-Deneyin Yapılışı

- Numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilir.
- Numuneler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenir. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulur.
- Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.
- Sabitlenmiş olan numunenin bozulmasına sebep olan yükün %5 ile %25 arasındaki basınç yükü uygulanır.
- Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1 sn'lik periyotta 0,1 rise time , 0,9 rest time olacak şekilde uygulanır.
- Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülür ve buradan da elastisite modülü hesaplanır.
- Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile, ± 2 ' lik hata ile sabitlenmiş yük uygulanır.
- Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilir. Yük 60 dakika ± 15 sn boyunca uygulanır.
- Sabitlenmiş yükün 60 dakika boyunca uygulanmasının ardından, geri dönen deformasyonun ölçülmesi için ilave bir 60 dakika yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülür.

-Hesaplamalar

Her bir numunenin 1, 10, 100, 1000 ve 3600 sn' deki Sünme Modülü Değerleri hesaplanır. İlave olarak karışımların değerlendirilmesi için deformasyon-süre eğrisi de çizilebilir.

Tek eksenli basınç numunelerine ait hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$Ecq(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c(t)}$$

$Ecq(t)$ = t anındaki sünme modülü (psi)

σ_c = Numunelere uygulanan basınç gerilmesi(psi)

$\varepsilon_c(t)$ = t anında tek ekseninde oluşan deformasyon (in/ in)

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta v(t)}{l}$$

l = Numune yüksekliği (in.)

$\Delta v(t)$ = t anında düşey yönde oluşan yer değiştirme (in)

-Dolaylı Çekme Gerilmesi Numunelerine Ait Hesaplamalar Aşağıda Verilmiştir.

$$Ect(t) = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t(t)}$$

σ_t = Numuneye uygulanan dolaylı çekme gerilmesi değeri

$$\sigma_t = \frac{P}{h} * 0,156$$

P = Numuneye uygulanan yük

$\varepsilon_t(t)$ = Sünme deformasyonu (in / in)

$$\varepsilon_t(t) = \Delta h(t) * \frac{(0,03896 + \nu * 0,1185)}{(0,0673 + \nu * 0,2494)}$$

$\Delta h(t)$ = t anındaki yatay yer değiştirme (in)

ν = poisson oranı

X = Numunenin geriye dönüş kabiliyeti

$$X = \frac{\Delta r(3600)}{\Delta v h(3600)}$$

$\Delta r(3600)$ = Deney sonunda tek eksenli basınç deneyinde geriye dönen düşey deformasyon veya dolaylı çekme deneyi için geriye dönen yatay deformasyon (yükün uygulandığı 2. 3600 sn 'deki)

$\Delta v h$ = Tek eksenli deneydeki düşey veya dolaylı çekme deneyindeki yatay deformasyon. Yüklü sürenin yani 1. 3600 sn 'nin sonundaki deformasyonlar.



6. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN DENEYLER

6.1 Giriş

Asfalt betonu karışımlar agrega ve bitümlü bağlayıcı olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Ayrıca karışımın dış etkilere karşı olan (çevre, trafik v.b.) performansını iyileştirmek amacıyla karışıma çeşitli katkı maddeleri ilave edilmektedir.

Bu bölümde,

- çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri
- karışım Tasarımı
- karışımın dolaylı çekme ve sünme özellikleri

deneysel olarak incelenmiştir.

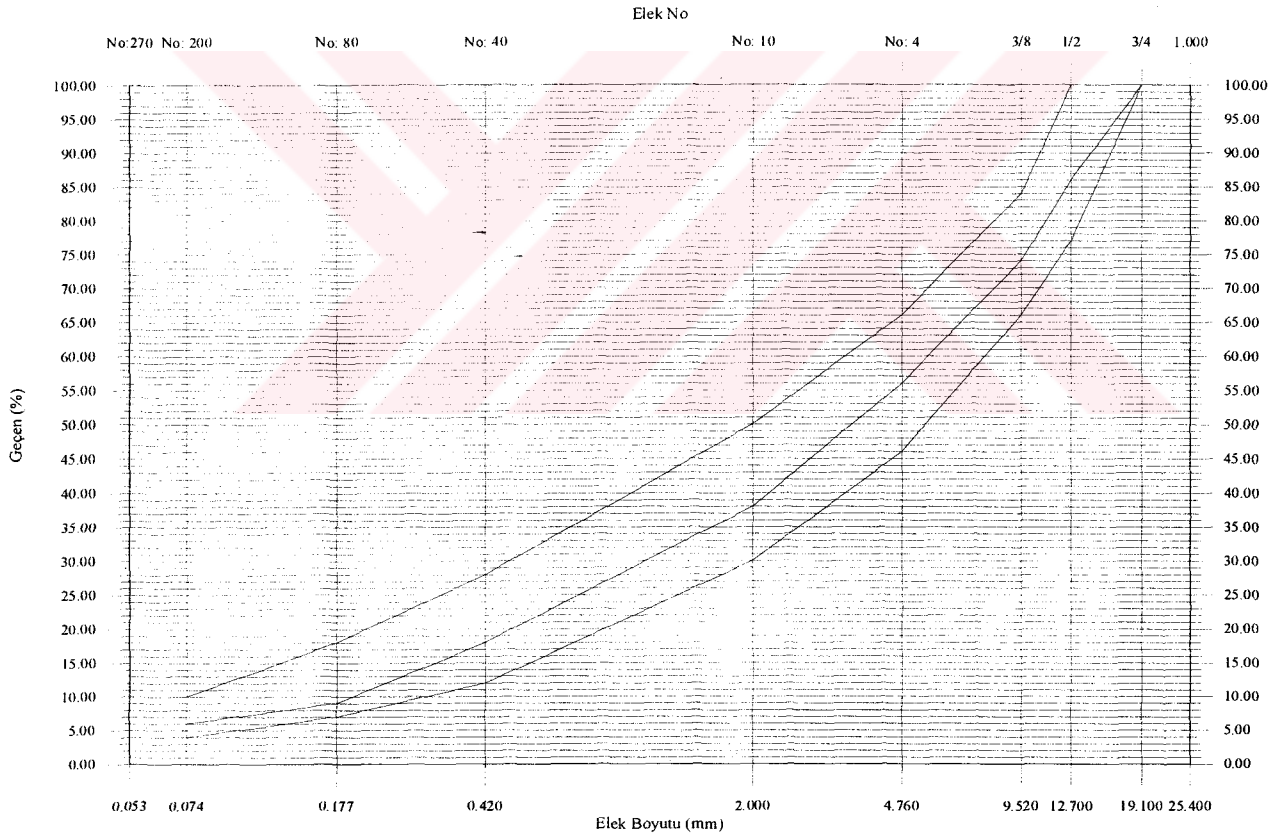
6.2 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

6.2.1 Agrega

Çalışmada Ömerli-Orkisan Taş Ocağı'ndan temin edilen agregadan Çizelge 6.1'de verilen T.C.K. Aşınma Tabakası Tip 2 Şartnamesine uygun agrega karışımı kullanılmıştır (TCK, 1994). Ayrıca agrega gradasyonu Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Agrega Gradasyonu

Elek Boyutu		Şartname Sınırları		Geçen (%)	Kalan (%)	Elekler Arası	
No	mm	Üst	Alt			(%)	(gr)
¾"	19,1	100	100	100	0	14	154
½"	12,7	100	77	86	14	12	132
3/8"	9,52	84	66	74	26	18	198
No. 4	4,76	66	46	56	44	18	198
No. 10	2,0	50	30	38	62	20	220
No. 40	0,42	28	12	18	82	9	99
No. 80	0,177	18	7	9	91	3	33
No. 200	0,074	10	4	6	94	6	66
						100	1100



Şekil 6.1 Agrega Gradasyonu

Yukarıda verilen gradasyona uygun olarak hazırlanan agregalar karışımlarının Kaba, İnce ve Filler olmak üzere ayrı ayrı Özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Kaba ve İnce agregalar için Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Kaba ve İnce Agregalar Özgül Ağırlıkları

	Kaba	İnce
Hacim Özgül Ağırlığı-Kuru (gr/cm^3)	2,695	2,666
Hacim Özgül Ağırlığı-Doygun Yüzey (gr/cm^3)	2,708	2,688
Zahiri Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,730	2,729
% Su emme	0,47	0,88

Filler Özgül Ağırlığı ise **2,747 gr/cm^3** olarak bulunmuştur.

6.2.2 Bağlayıcı

Bu çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen 75/100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bitüm standart asfalt deneylerine tabii tutulmuş ve deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge-6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri

Penetrasyon, 25 °C, 100 gr, 5 s (1/10 mm)	79
Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	1,019
Parlama Noktası (°C)	210
Düktilite, 25 °C, 5 cm/min	+100
Yumuşama Noktası (°C)	52

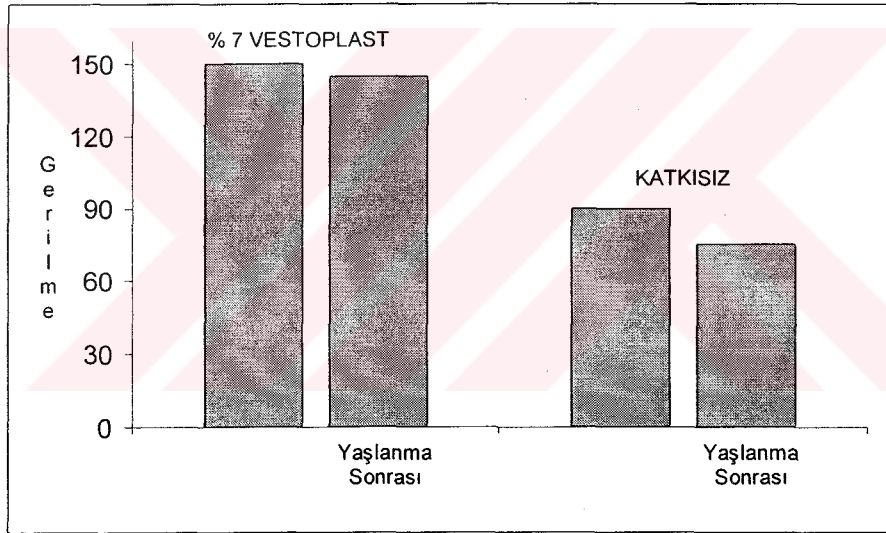
6.2.3 Katkı malzemesi

Çalışmanın içeriği bakımından katkı malzemesinin cinsinin öneminin bulunmaması nedeniyle değerlendirmede, deneysel aşamada laboratuarda yeteri miktarda bulunması nedeniyle katkı malzemesi olarak Vestoplast kullanılmıştır. Plastomer grubunda bulunan vestoplast etan-propan-buten’den oluşan bir amorf polyafolefin (Müller, 1997). Ürün çeşitleri olarak karışım katkı malzemesi olan Vestoplast S ve Vestoplast SR, bitüm katkı

malzemesi olan Vestoplast L ve emülsiyon katkı malzemesi olan Vestoplast E bulunmaktadır. Çalışmada karışım katkı malzemesi olan Vestoplast S tipi, ürün broşürlerinde önerildiği şekilde karışıma bitüm ağırlığının % 7'si oranında ilave edilerek deneylere tabii tutulmuştur.

Malzemenin katılması ile karışımın, yapışma gücü artar ve gerilmelere karşı göstermiş olduğu direnç yükselir. Bu özelliğinden dolayı çok ağır trafik yüküne rağmen Vestoplast katkılı asfalt çok yüksek bir deformasyon mukavemeti göstermektedir. Diğer bir avantajı ise bağlayıcının ısıya karşı olan hassasiyetinde getirmiş olduğu iyileştirme (Marl, 1996).

Vestoplast katkı malzemesinin karışımın mukavemeti üzerine getirmiş olduğu iyileştirme Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2 % 7 Vestoplast katkılı karışım ve geleneksel karışımın mukavemetlerinin karşılaştırması

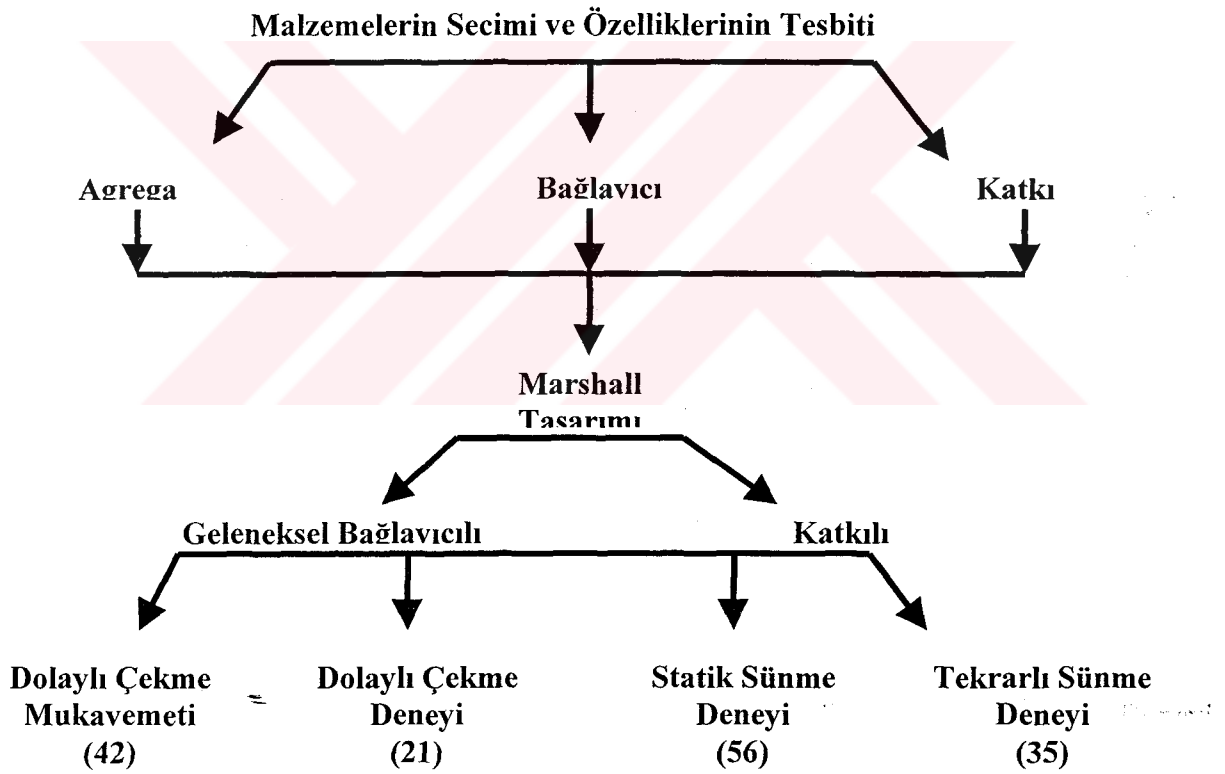
6.3 Karışıma Uygulanan Deneyler

6.3.1 Giriş

Bu çalışmada, hazırlanan karışım değişkenlerinin karışımın stabilite, yorulma ve tekerlek izi oluşumu performansı üzerine olan etkilerini değerlendirmek amacıyla;

- Marshall Tasarımı
- Dolaylı Çekme Mukavemeti
- Dolaylı Çekme Deneyi
- Statik Sünme Deneyi
- Tekrarlı Sünme Deneyi

deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar ve deneylerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.3’de deneylerin uygulama sırası, parantez içerisinde ise her bir deney için hazırlanan numune sayıları gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Karışım Deneyleri Akış Şeması ve Numune Sayıları

6.3.2 Marshall Tasarım Deneyi

Agrega ve bitümlü bağlayıcıdan meydana gelen asfalt betonu karışımlarının optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi amacıyla karışımlara, ülkemizde yoğun olarak kullanılmakta olan Marshall Tasarım Deneyi, ASTM D-1559 standartına uygun olarak uygulanmıştır.

Bu deneyde, Marshall Cihazı yardımıyla bitümlü karışımın plastik akma direnci tayin edildikten sonra hesaplara geçilerek asfalt çimentosu yüzdesi ile pratik birim ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk yüzdesi ve akma ilişkileri çıkartılır. Elde edilen değerlerin şartname sınır değerleri kontrol edildikten sonra optimum asfalt çimentosu yüzdesi tayin edilir.

Deney numuneleri, her bir deney grubu ayrı olmak üzere aynı asfalt çimentosu (AC) yüzdesi için üç adet olarak hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılan (AC) yüzdeleri %4-6,5 arasında değiştirilmiştir.

Karıştırma sıcaklığı 180 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 150 °C olarak alınmıştır. Karıştırma işlemi, önce ısıtılan agreganın kuru olarak karıştırılması, daha sonra ortasına açılan çukura belirlenen sıcaklıkta AC konularak, agregaya bitümlü malzeme ile iyice sarılıncaya kadar mikserde karıştırılması ile tamamlanmıştır.

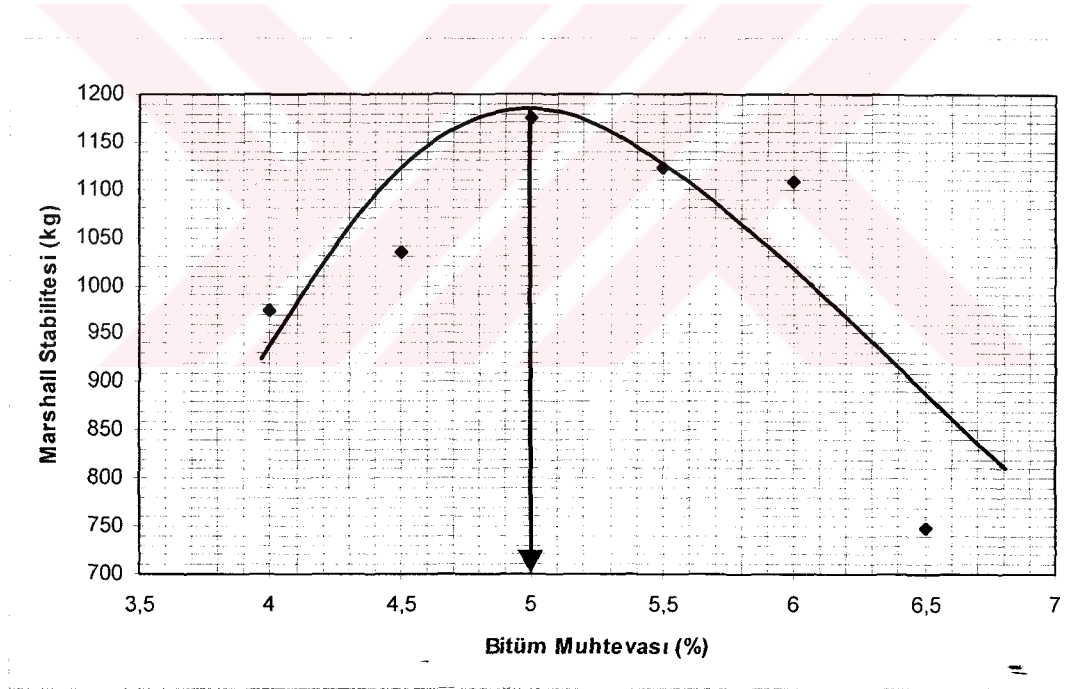
Hazırlanan sıcak karışım kalıp içerisine aktarıldıktan sonra 15 defa kenarı, 10 defa da ortası şişlenmiş numune üzerine filtre kağıdı konulduktan sonra sıkıştırma tokmağı 457 mm'den serbest olarak düşürülerek 50 darbelik sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Aynı işlem, numune ters çevrilerek de tekrarlanmıştır.

Hazırlanan numuneler numune çıkartma cihazı ile kalıptan çıkartılarak laboratuvar sıcaklığında 1 gün bekletildikten sonra havada ve suda (25 °C) tartıları alınmış ve yükseklikleri 3 ayrı yerden kumpasla ölçülmüştür.

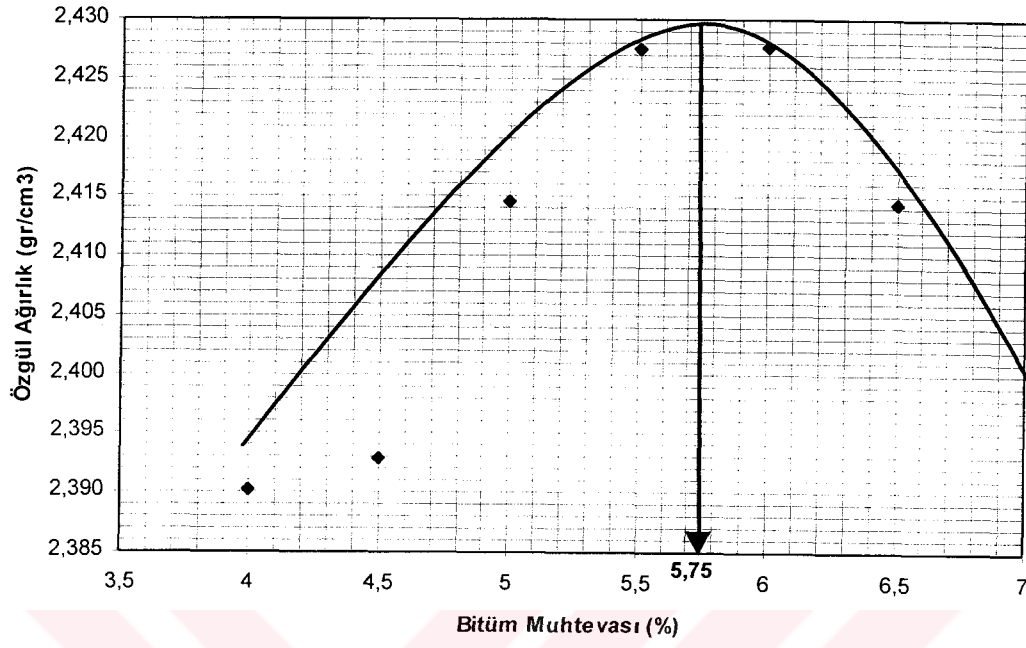
Sıcaklığı 60 °C olan su banyosunda 40 dakika bekletilen numuneler daha sonra Marshall Cihazında 51 mm/dak'lık sabit bir deformasyon hızıyla yüklenmiştir. En büyük yük ve akma değeri saptandıktan sonra, stabilite değeri olarak okunan değerler, numune yüksekliğine bağlı olarak kullanılan düzelme faktörleri ile çarpılarak değerlendirmeye esas alınacak stabiliteler tespit edilmiştir.

Bu deney geleneksel bağlayıcı ve %7 Vestoplast katkılı karışımlar için ayrı olarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, geleneksel bağlayıcı için EK A'da Çizelge A.1 ve Vestoplast katkılı karışımlar için ise Çizelge A.2'de verilmiştir.

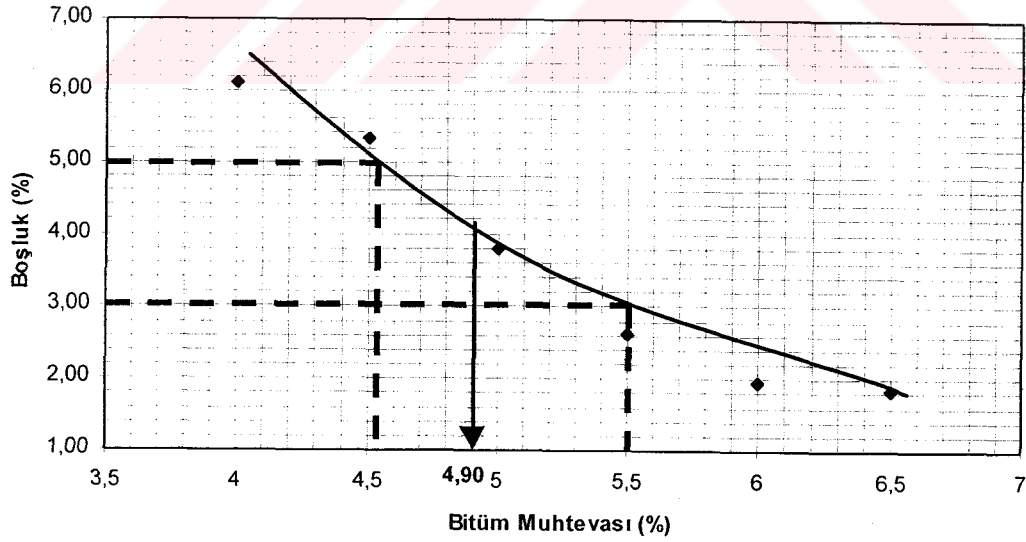
Geleneksel bağlayıcı karışımların optimum bitüm muhtevası değerlerini belirlemek amacıyla gerekli olan ilişkiler Şekil 6.4 –6.8 arasında verilmiştir.



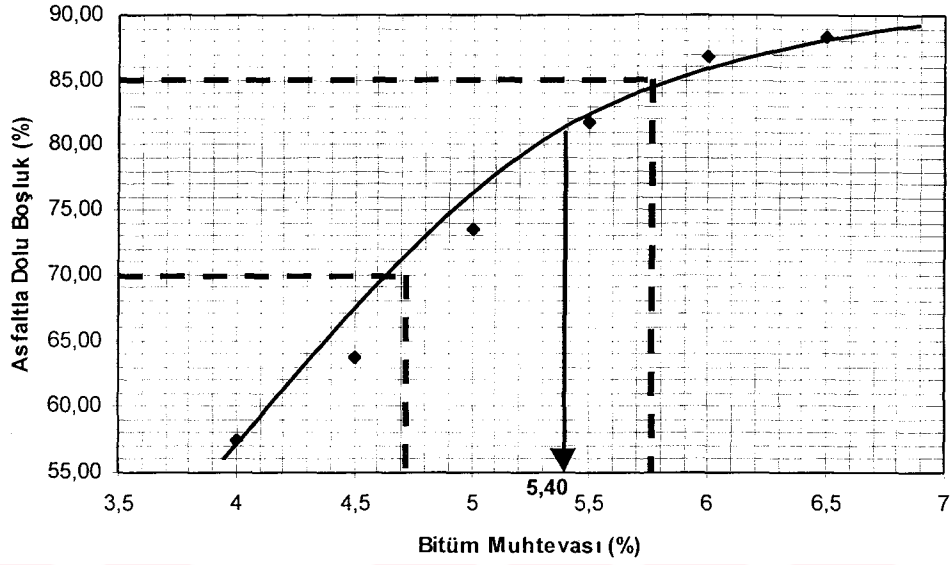
Şekil 6.4 Marshall Stabilitesi-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.5 Özgöl Ağırlık-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.6 Boşluk(%)-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.7 Asfaltla Dolu Boşluk (%) - Bitüm Muhtevası İlişkisi

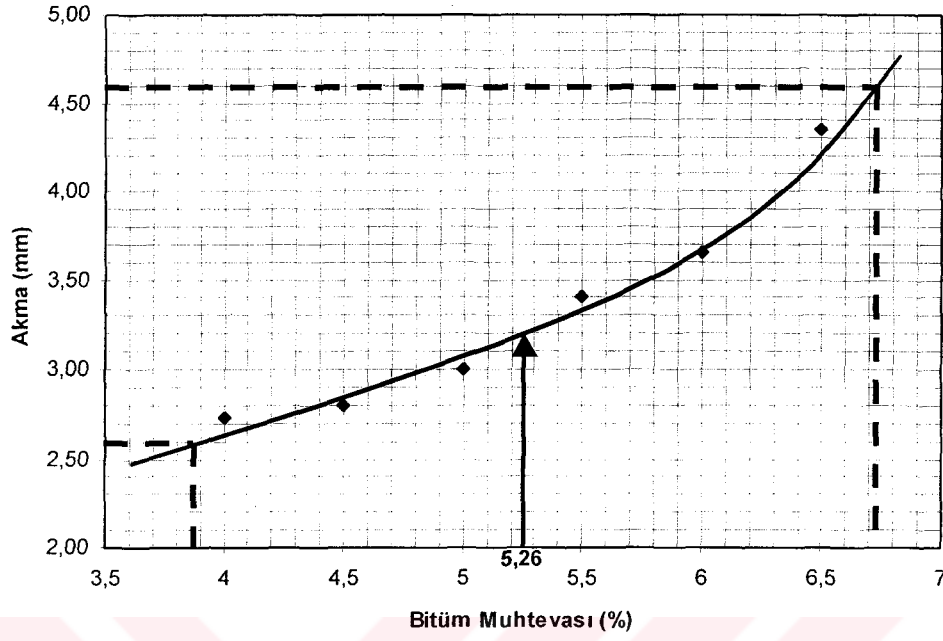
Geleneksel karışım için optimum asfalt muhtevası değerleri;

Maksimum Marshall Stabillitesi için	: 5,00
Maksimum Özgül Ağırlık için	: 5,75
Boşluk Yüzdesi için	: 4,90
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi için	: 5,40

olarak alınmıştır. Bu değerlere göre geleneksel karışımın optimum asfalt muhtevası;

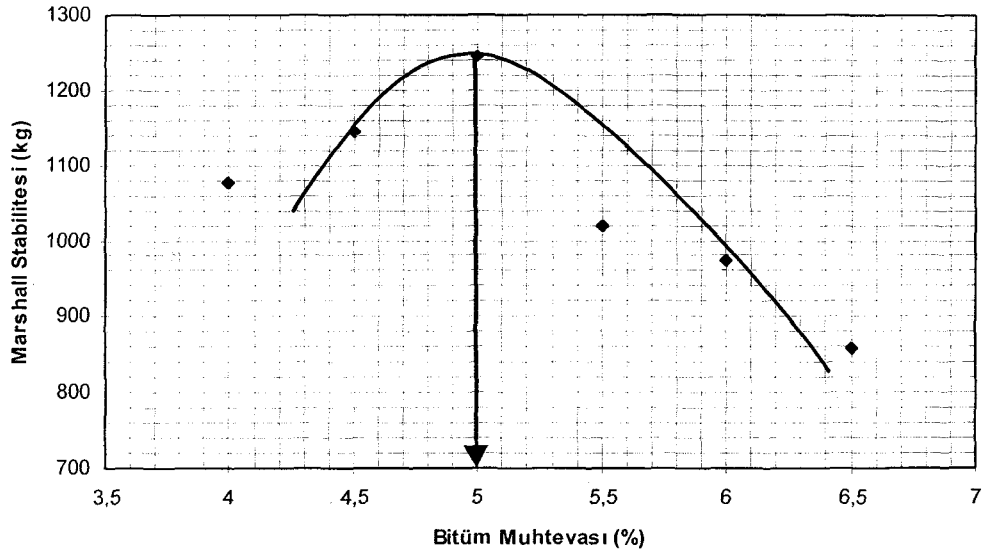
$$optAC = \frac{5,00 + 5,75 + 4,90 + 5,40}{4} = 5,26(\%)$$

hesaplanmıştır. Bulunan bu değer Akma bakımından kontrolü için Şekil 6.8 çizilmiştir. Şekil incelendiğinde karışımın akma sınır değerleri arasında kaldığı görülmektedir.

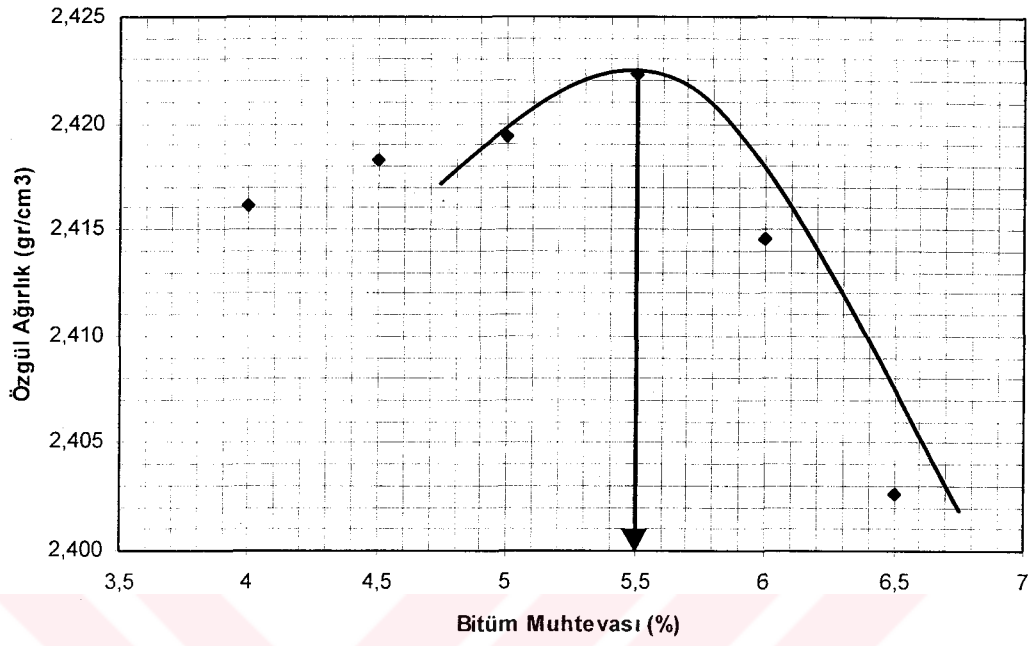


Şekil 6.8 Akma-Bitüm Muhtevası İlişkisi

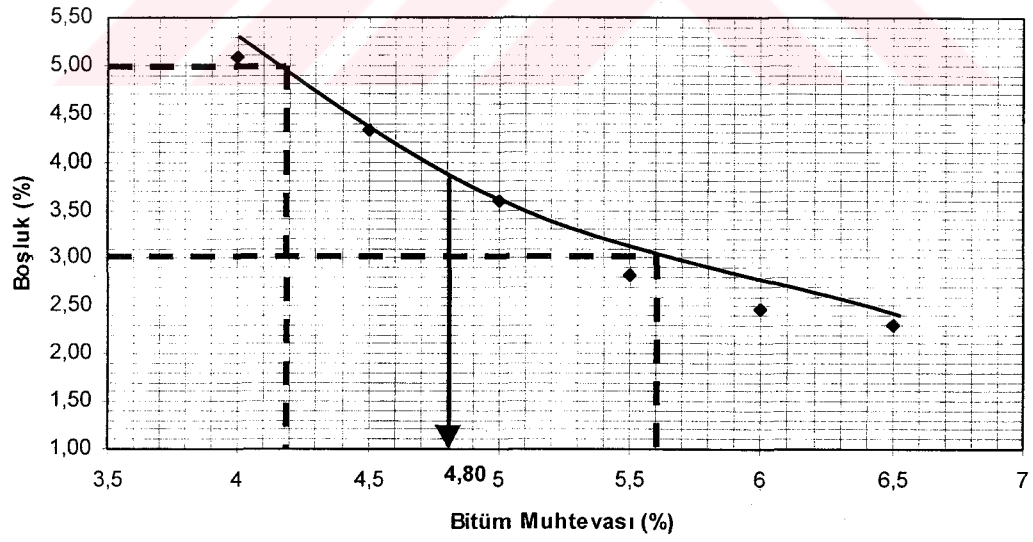
Vestoplast katkılı karışımların optimum bitüm muhtevası değerlerini belirlemek amacıyla gerekli olan ilişkiler Şekil 6.9 –6.13 arasında verilmiştir.



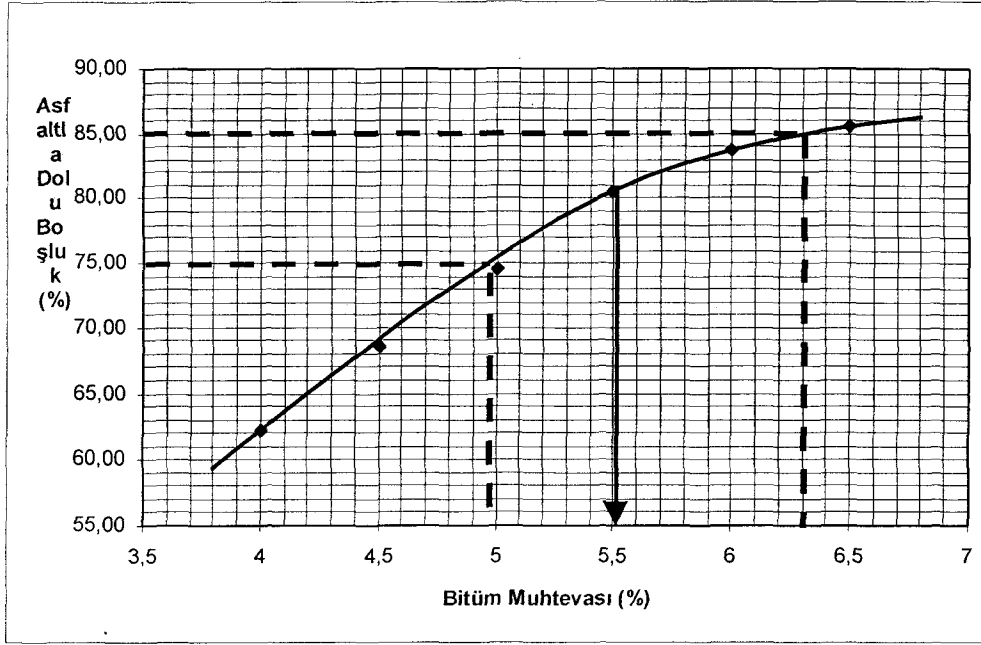
Şekil 6.9 Marshall Stabilitesi-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.10 Özgül Ağırlık-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.11 Boşluk(%)-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.12 Asfaltla Dolu Boşluk (%) - Bitüm Muhtevası İlişkisi

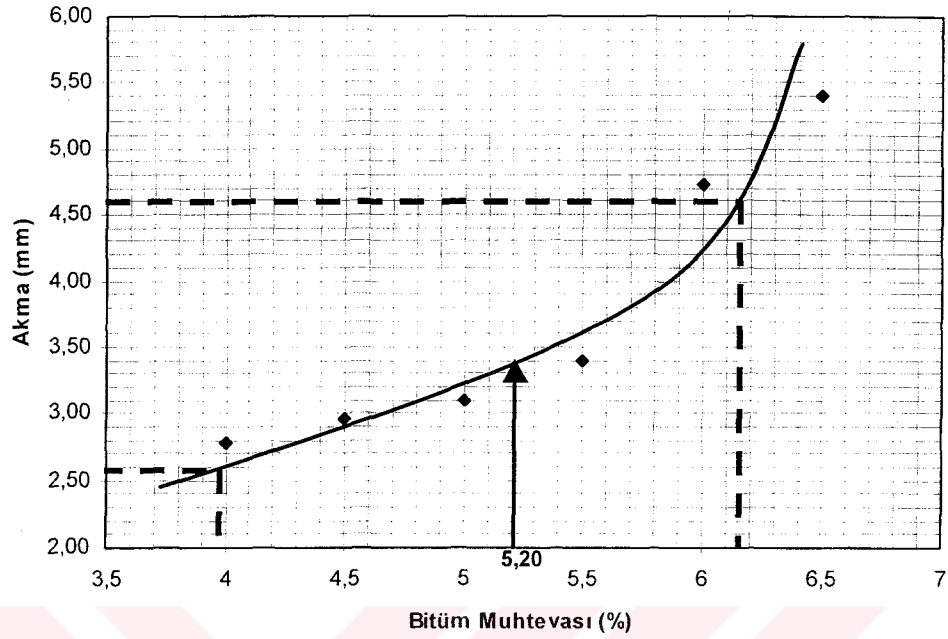
Vetoplast katkılı karışım için optimum asfalt muhtevası değerleri;

Maksimum Marshall Stabilitesi için	: 5,00
Maksimum Özgül Ağırlık için	: 5,50
Boşluk Yüzdesi için	: 4,80
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi için	: 5,50

olarak alınmıştır. Bu değerlere göre geleneksel karışımın optimum asfalt muhtevası;

$$optAC = \frac{5,00 + 5,50 + 4,80 + 5,50}{4} = 5,20(\%)$$

hesaplanmıştır. Bulunan bu değer Akma bakımından kontrolü için Şekil 6.13 çizilmiştir. Şekil incelendiğinde karışımın akma sınır değerleri arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 6.13 Akma-Bitüm Muhtevası İlişkisi

6.3.3 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

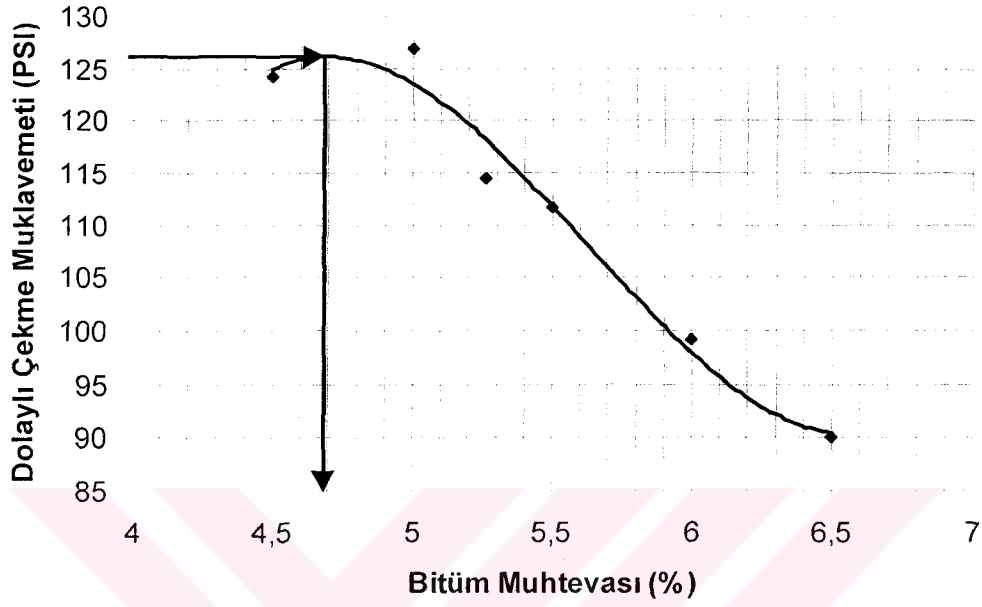
Bu deney, Bölüm 5 'de anlatıldığı şekilde % 4,5-6,5 geleneksel bağlayıcı karışımlar ve ilave olarak OptAC (geleneksel bağlayıcı kullanılarak optimum asfalt muhtevasında hazırlanan karışım) ve OptACv (vestoplast katkı malzemesi ilave edilerek optimum asfalt muhtevasında hazırlanan karışım)'de hazırlanan Marshall numunelerine 25 °C sıcaklıkta dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır.

Deney esnasında numunenin kırıldığı andaki yük ve düşey deformasyon okunarak kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalarda; Monismith, Tung-Wen Hsu, Baladi gibi araştırmacıların kabul ettiği şekilde karışımların Poisson oranı 0,35 alınarak yatay yönde oluşan deformasyonlar hesaplanmıştır (Monismith, vd., TRR1492, Tung-Wen, vd., 1996, Baladi, vd., 1989). Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'de verilmiştir.

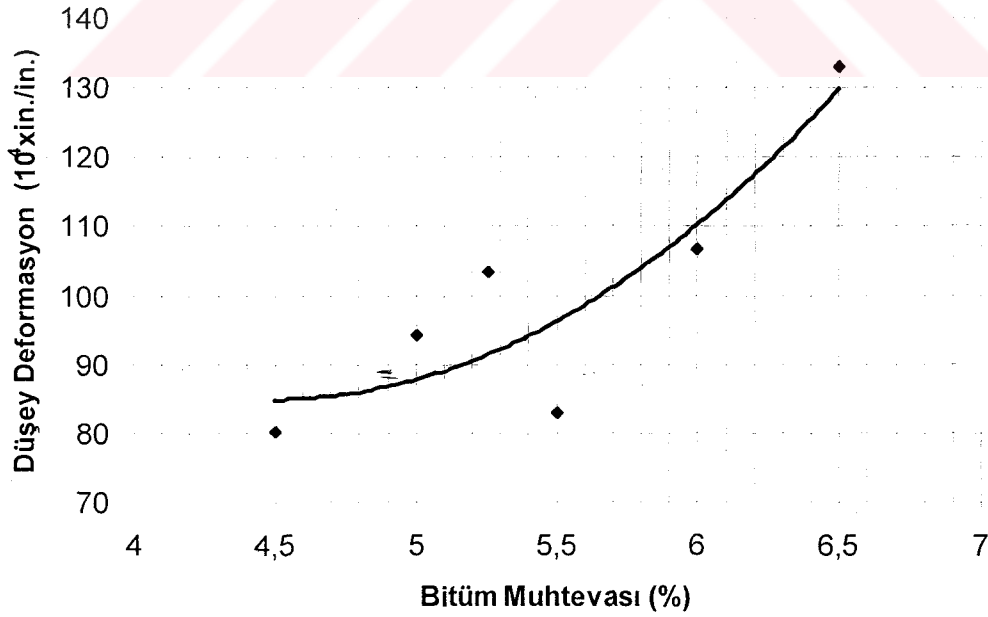
Çizelge 6.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti

Bitüm %	Numune				Yer Değiştirme		Deformasyon		Çekme Muk. St PSI
	No	Yük. h		Pb	Düşey Δv	Yatay Δh	Çekme ϵt	Basınç ϵc	
		mm	in.		(in.) $\times 10^3$	(in.) $\times 10^3$	(in./in.) $\times 10^4$	(in./in.) $\times 10^4$	
4,5	1	59,8	2,35	1870	70,9	13,0	67,75	111,26	123,93
	2	60,1	2,37	1886	94,5	17,4	90,34	148,35	124,35
	3	59,7	2,35	1877	86,6	15,9	82,81	135,98	124,59
	ort						80,30	131,86	124,29
5	1	58,7	2,31	1933	70,9	13,0	67,75	111,26	130,50
	2	58,8	2,31	1922	94,5	17,4	90,34	148,35	129,52
	3	58,8	2,31	1792	129,9	23,9	124,21	203,98	120,74
	ort						94,10	154,53	126,92
5,5	1	59,3	2,33	1803	82,7	15,2	79,04	129,80	120,47
	2	59,7	2,35	1632	106,3	19,5	101,63	166,89	108,32
	3	59,8	2,35	1605	70,9	13,0	67,75	111,26	106,35
	ort						82,81	135,98	111,71
6	1	59,6	2,35	1607	98,4	18,1	94,10	154,53	106,86
	2	60,1	2,37	1378	114,2	21,0	109,16	179,25	90,85
	3	59,6	2,35	1499	122,0	22,4	116,68	191,61	99,69
	ort						106,65	175,13	99,13
6,5	1	60,0	2,36	1571	110,2	20,3	105,39	173,07	103,77
	2	60,0	2,36	1333	169,3	31,1	161,85	265,79	88,04
	3	60,3	2,37	1196	137,8	25,3	131,74	216,34	78,59
	ort						132,99	218,40	90,13
OptAC	1	57,9	2,28	1983	98,4	18,1	94,10	154,53	135,69
	2	59,7	2,35	1562	108,3	19,9	103,51	169,98	103,70
	3	59,7	2,35	1569	118,1	21,7	112,92	185,43	104,14
	ort						103,51	169,98	114,51
OptACv	1	57,2	2,25	2365	86,6	15,9	82,81	135,98	163,82
	2	59,7	2,35	1859	82,7	15,2	79,04	129,80	123,39
	3	59,8	2,35	1873	94,5	17,4	90,34	148,35	124,08
	ort						84,06	138,04	137,10

Bitüm muhtevası ile dolaylı çekme mukavemetinin değişimini göstermek amacıyla Şekil 6.14 çizilmiştir. Bitüm muhtevası ile düşey yönde oluşan deformasyon arasındaki ilişki ise Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.14 Dolaylı Çekme Mukavemeti-Bitüm Muhtevası İlişkisi



Şekil 6.15 Düşey Deformasyon-Bitüm Muhtevası İlişkisi

Şekil incelendiğinde de görülebileceği gibi karışımın yaklaşık olarak 127,5 psi dolaylı çekme mukavemeti değerinde %4,7 optimum asfalt muhtevası değeri bulunmaktadır. Düşey deformasyon için ise Marshall Dizayn Deneyi Akma-Bitüm Muhtevası ilişkisine benzer bir eğri bulunmaktadır.

6.3.4 Dolaylı Çekme Deneyi

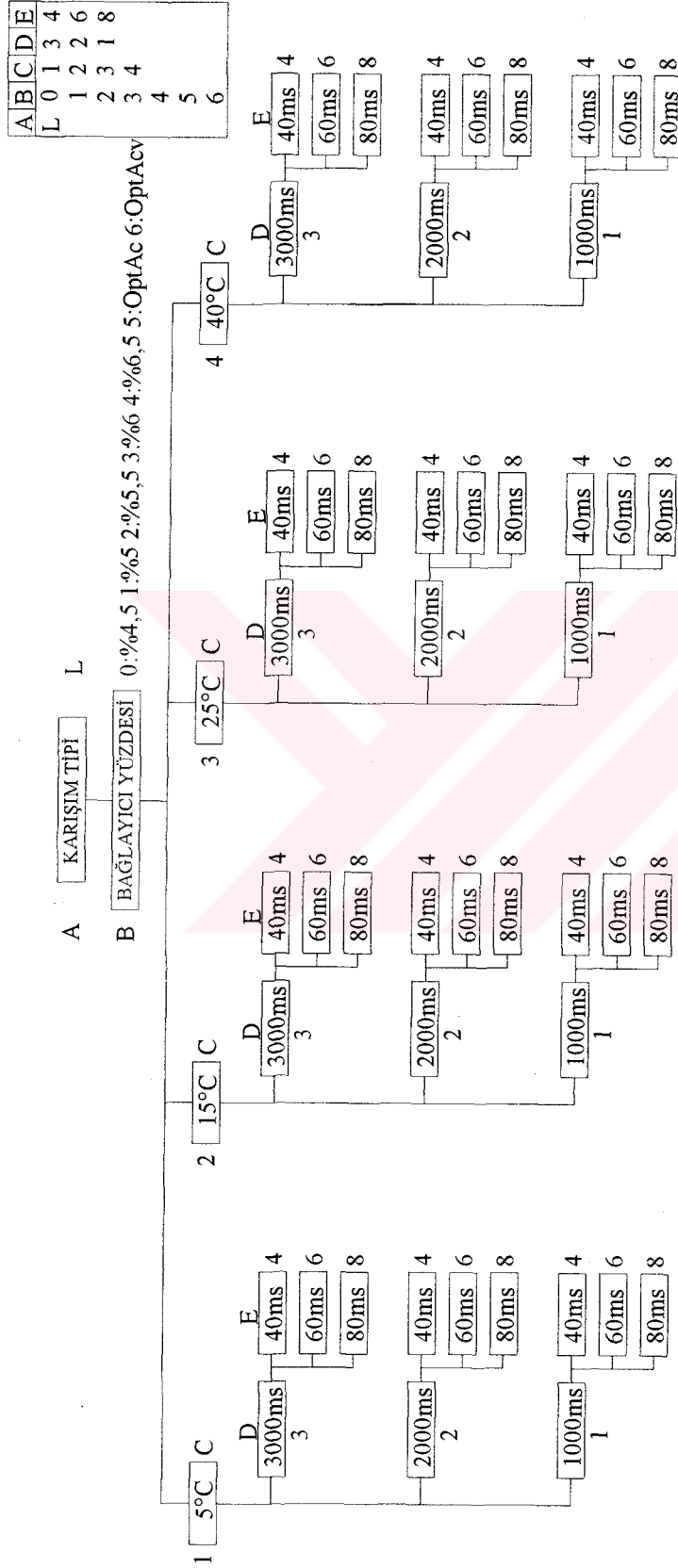
Numuneler üzerine, ASTM D-4123-82 standardına uygun olarak Dolaylı Çekme Deneyi yapılmıştır. Dolaylı çekme deneyinde deneylerin uygulanma akış şeması ve numunelerin kodlandırma sistemi Şekil 6.16'da verilmiştir.

Şekil incelendiğinde de görülebileceği gibi deney 5 farklı bitüm muhtevası (4,5; 5; 5,5; 6; 6,5) ve geleneksel ve katkılı bağlayıcılı numuneler üzerine uygulanmıştır. C. L. Monismith, vd., tarafından yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklıklarda (40°C) aşırı düşey deformasyonların olması nedeniyle güvenilir olmadığı ve 60 °C sıcaklıkta yapılan deneylerin tam kesin olmadığı belirtilmektedir (Monismith, vd., TRR 1492). Bu nedenle, deneysel çalışma aşamasında sıcaklık için üst sınır olarak 40 °C ve alt sınır olarak da 5 °C sıcaklık alınmış ve deneyler 5, 15, 25 ve 40 °C sıcaklıklar da yapılmıştır.

Ayrıca yük olarak 25 °C sıcaklıkta yapılan Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinden elde edilen mukavemet değerinin yaklaşık % 20'sine karşılık gelen 1500 N yük uygulanmıştır. Deneysel çalışma aşamasında diğer deney değişkenleri; Yükleme Periyodu ve Yükleme Hızı Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 Yükleme Periyodu ve Yükleme Hızı

Yükleme Periyodu		Yükleme Hızı (ms)
Hız.	Tekerrür Süresi (ms)	
0,33	3000	40
0,50	2000	60
1,00	1000	80



Şekil 6.16 Deney Uygulama Sıralaması ve Deney Numunelerinin Kodlama Sistemi

Çizelge 6.5'den de görülebileceği gibi Yükleme Periyodu olarak yüksek yoğunluklu trafik için 1000 ve düşük yoğunluklu trafik için ise 3000 ms'lik yük tekrür süresi ve taşıt hızları veya dingil geçiş hızını temsil etmesi içi yüksek hızlar için 40 ms ve düşük hızlar için ise 80 ms'lik Yükleme Hızları seçilmiştir. Yapılan bu kabuller ASTM D-4123 standardında da önerilmektedir.

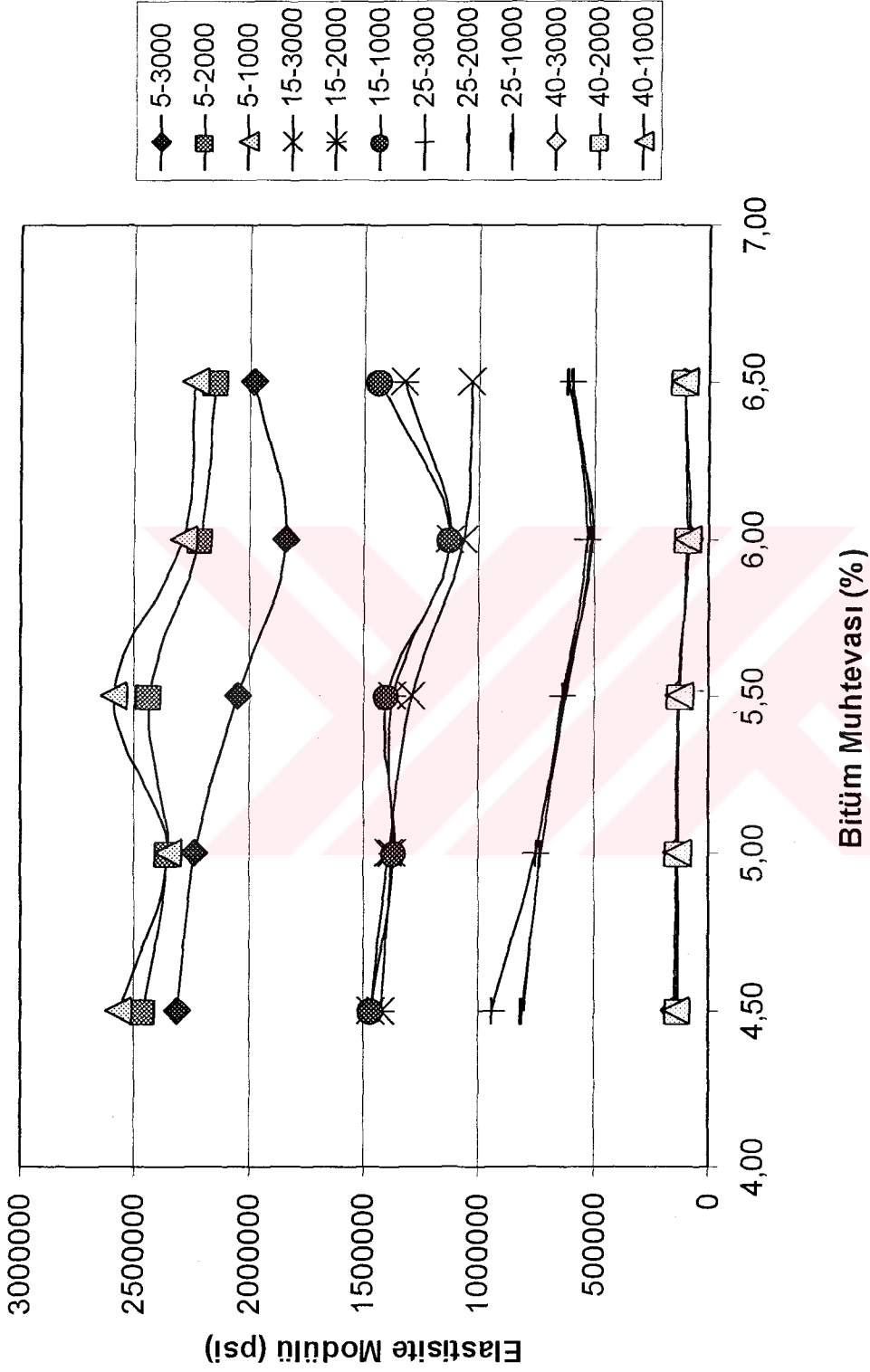
Bu deney için her bir bitüm muhtevası için 21 adet numune hazırlanmış ve toplam olarak 1586 adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar özet olarak EK B'de Çizelge B.1-Çizelge B.28 arasında verilmiştir.

6.3.4.1 Karışım Değişkenlerinin Elastisite Modülü Üzerine Olan Etkisi

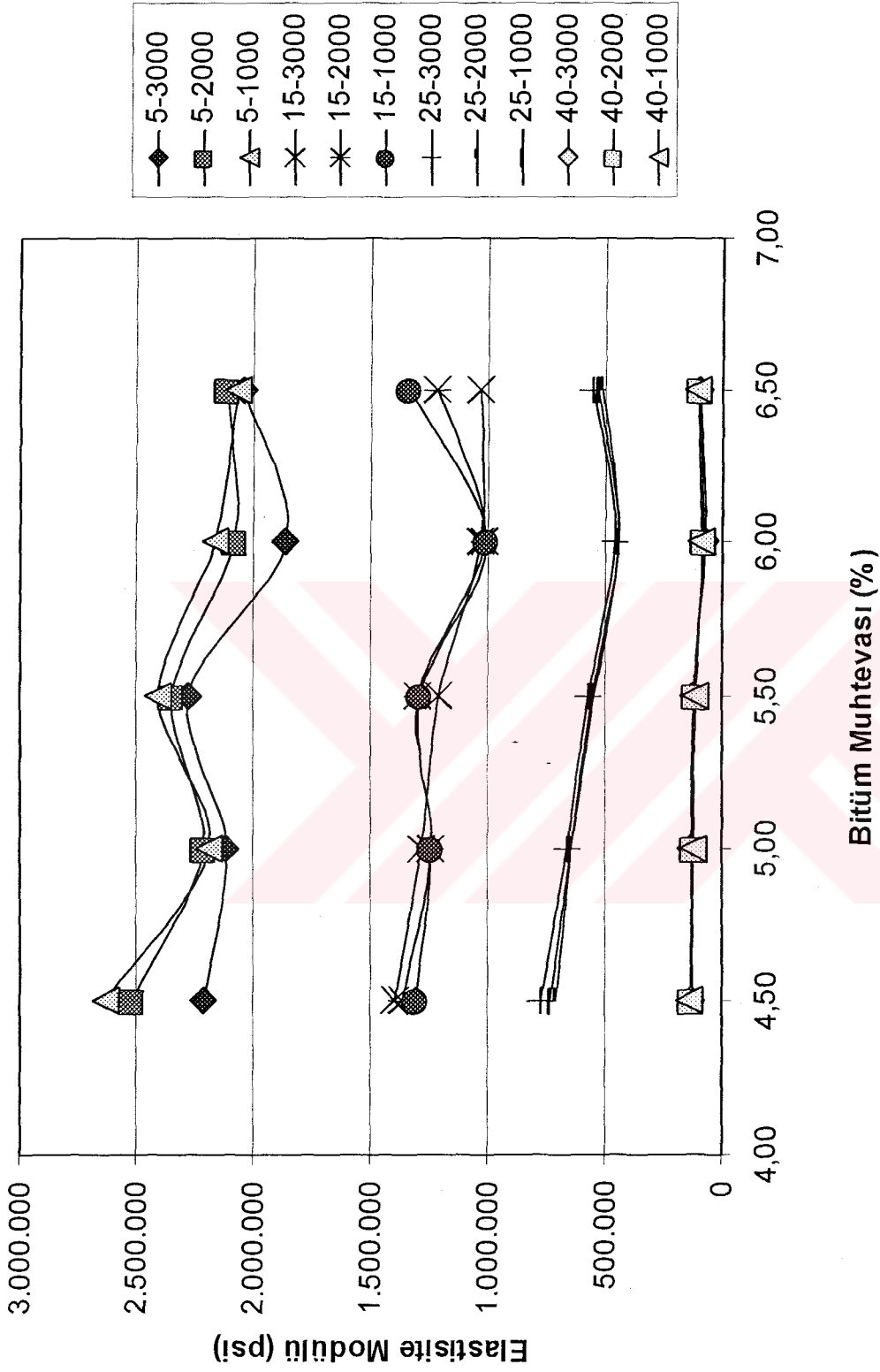
Karışım değişkenlerinden bitüm muhtevasının yorulma direnimi üzerinde olan etkisinin değerlendirilmesi amacıyla bitüm muhtevası-elastisite modülü ilişkileri farklı yükleme periyotlarında 40 ms yükleme hızı için Şekil 6.17, 60 ms için Şekil 6.18 ve 80 ms için ise Şekil 6.19'da verilmiştir. Karışımların elastisite modülü değerleri 3×10^6 ile 350×10^3 psi arasında değişmektedir. Bitüm muhtevasındaki artışla birlikte elastisite modülü değerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bitüm muhtevasının karışımın elastikliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 6.6 hazırlanmıştır. Bu çizelge de her bir bitüm muhtevası için ,aynı yükleme periyodu, yükleme hızı ve sıcaklık için ölçülen en büyük elastisite modülü değeri yine ölçülen en küçük elastisite modülü değerine bölünerek bir bitüm muhtevası etkisi oranı hesaplanmıştır.

Çizelge 6.6 Bitüm Muhtevasının Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi

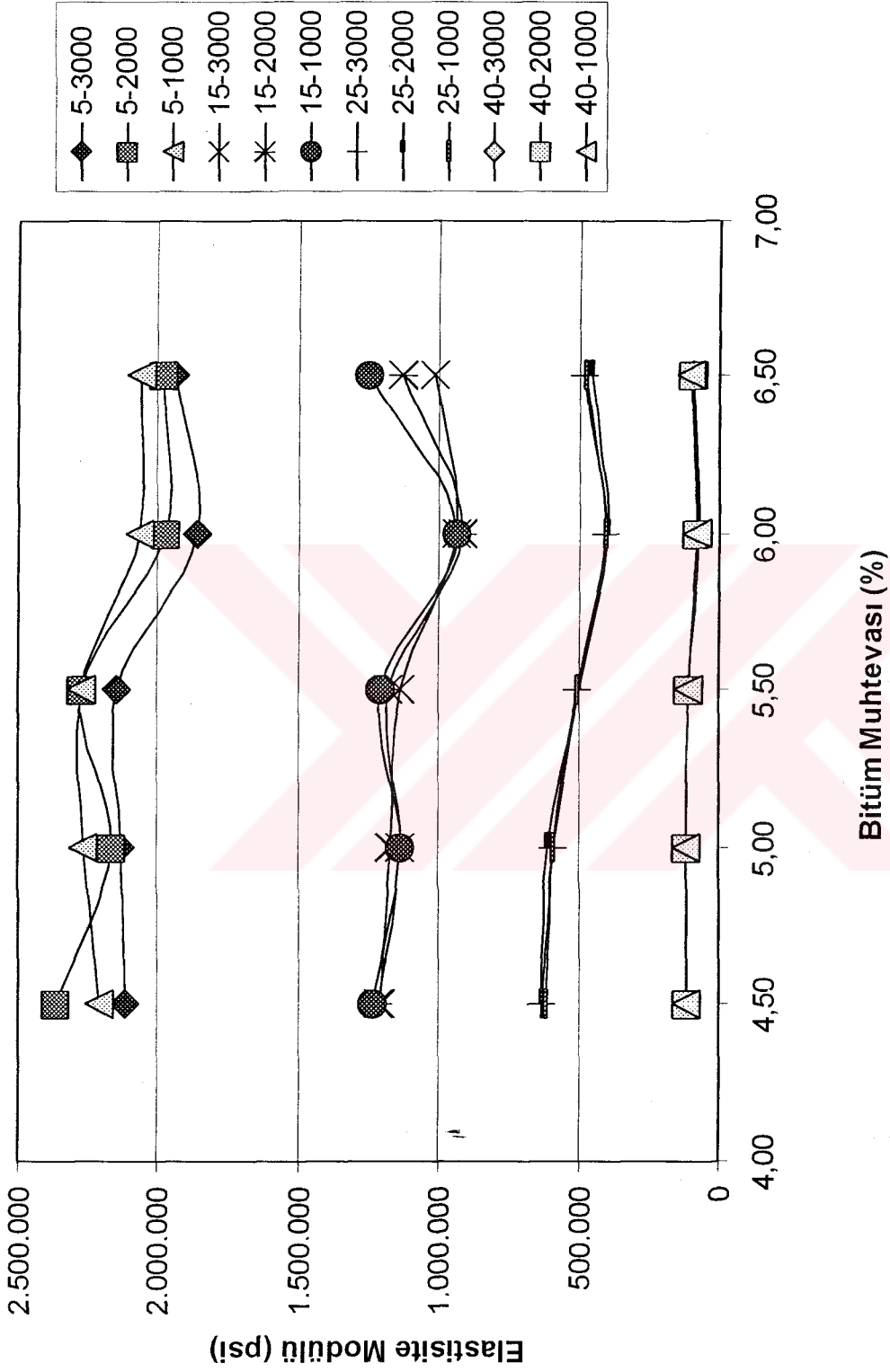
	Yükleme Periyodu (ms)								
	3000			2000			1000		
Yük. Hızı (ms)	40	60	80	40	60	80	40	60	80
Sıcaklık (°C)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)
5	1,26	1,22	1,15	1,14	1,21	1,2	1,16	1,27	1,10
15	1,43	1,35	1,28	1,26	1,34	1,32	1,31	1,32	1,34
25	1,78	1,68	1,57	1,58	1,60	1,59	1,61	1,65	1,53
40	1,88	1,81	1,67	1,53	1,63	1,55	1,52	1,6	1,45



Şekil 6.17 Bitüm Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)



Şekil 6.18 Bitüm Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)



Şekil 6.19 Bitum Muhtevası-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)

Deneysel çalışmada kullanılan % 4,5 ve % 6,5 aralığındaki bitüm muhtevastaki farklılık, elastisite modülü değerini en az 1,1 ve en fazla ise 1,88 katı olarak etkilemektedir.

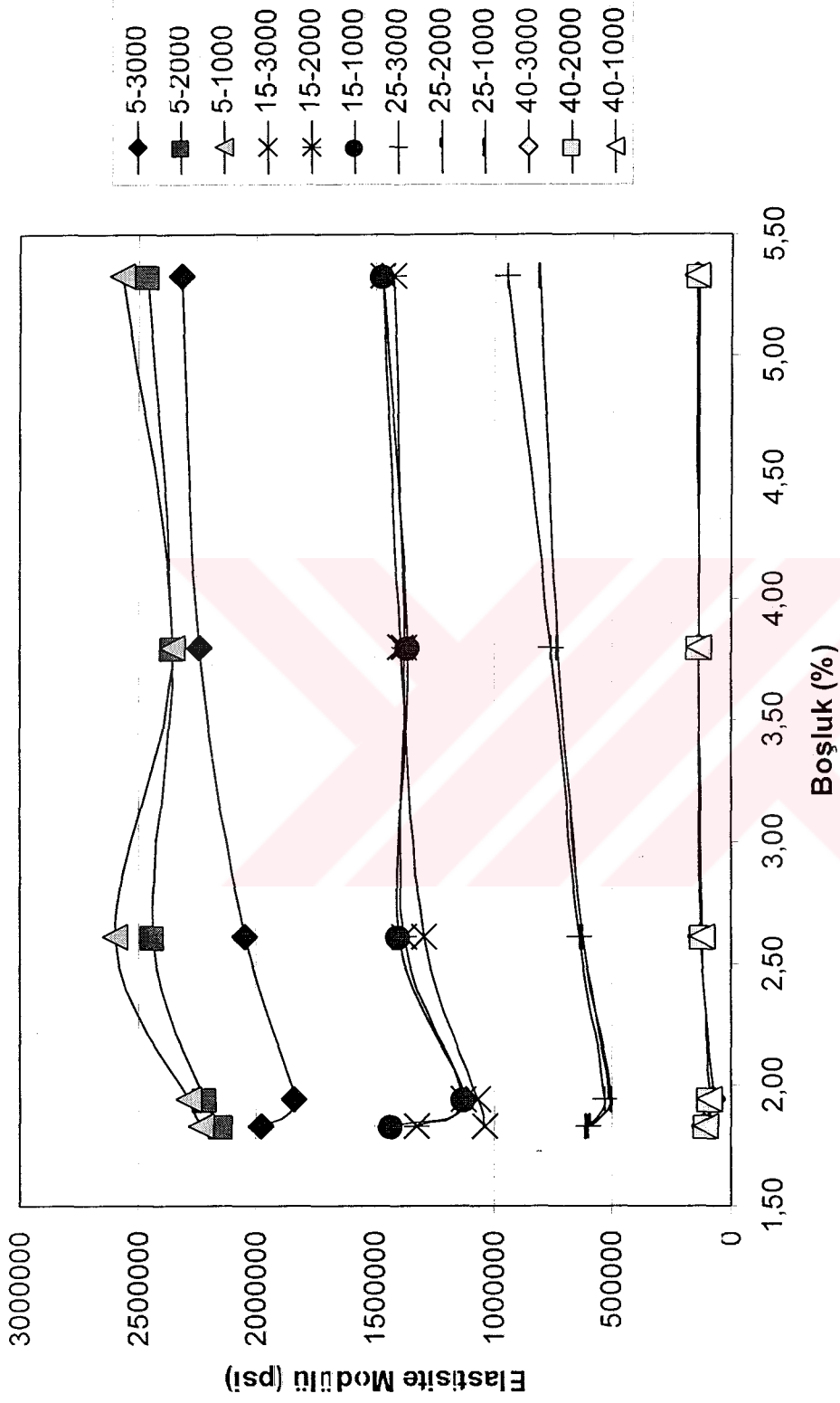
Ayrıca şekiller incelenirse sıcaklığın artmasıyla elastisite modülü değerinin azaldığı görülmektedir.

Ayrıca karışımın içerisindeki boşluk yüzdesinin etkisini değerlendirmek amacıyla 40 ms yükleme hızı için Şekil 6.20, 60 ms için Şekil 6.21 ve 80 ms için ise Şekil 6.22 çizilmiştir. Şekillerin incelenmesinden de görülebileceği gibi karışım içerisindeki boşluk yüzdesinin artması ile bitüm muhtevastada oluşan durumun tersine olarak elastisite modülü değeri artmaktadır. Bu durumun oluşmasının sebebi karışımın bitüm muhtevası ile boşluk arasında ters bir ilişkinin bulunmasıdır. Çünkü karışımın bitüm muhtevası artması ile karışımın boşluk yüzdesi azalmaktadır.

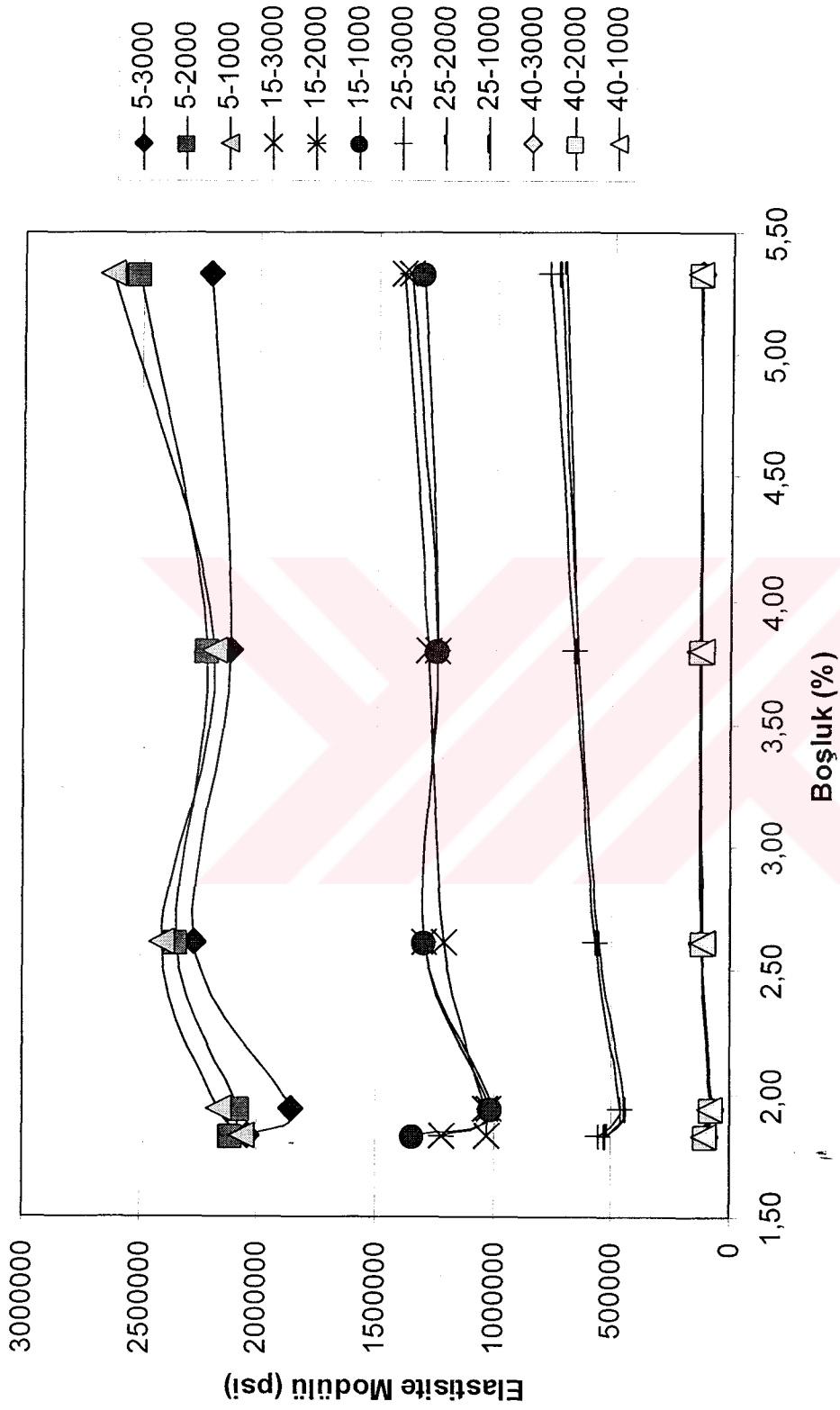
Karışım değişkenlerinden olan asfaltla dolu boşluk yüzdesinin elastisite modülü üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla da yine 40 ms yükleme hızı için Şekil 6.23, 60 ms için Şekil 6.24 ve 80 ms için ise Şekil 6.25 hazırlanmıştır.

Söz konusu şekillerin incelenmesinden de görülebileceği gibi karışımın Asfalt dolu boşluk yüzdesinin artması ile elastisite modülü değeri azalmaktadır.

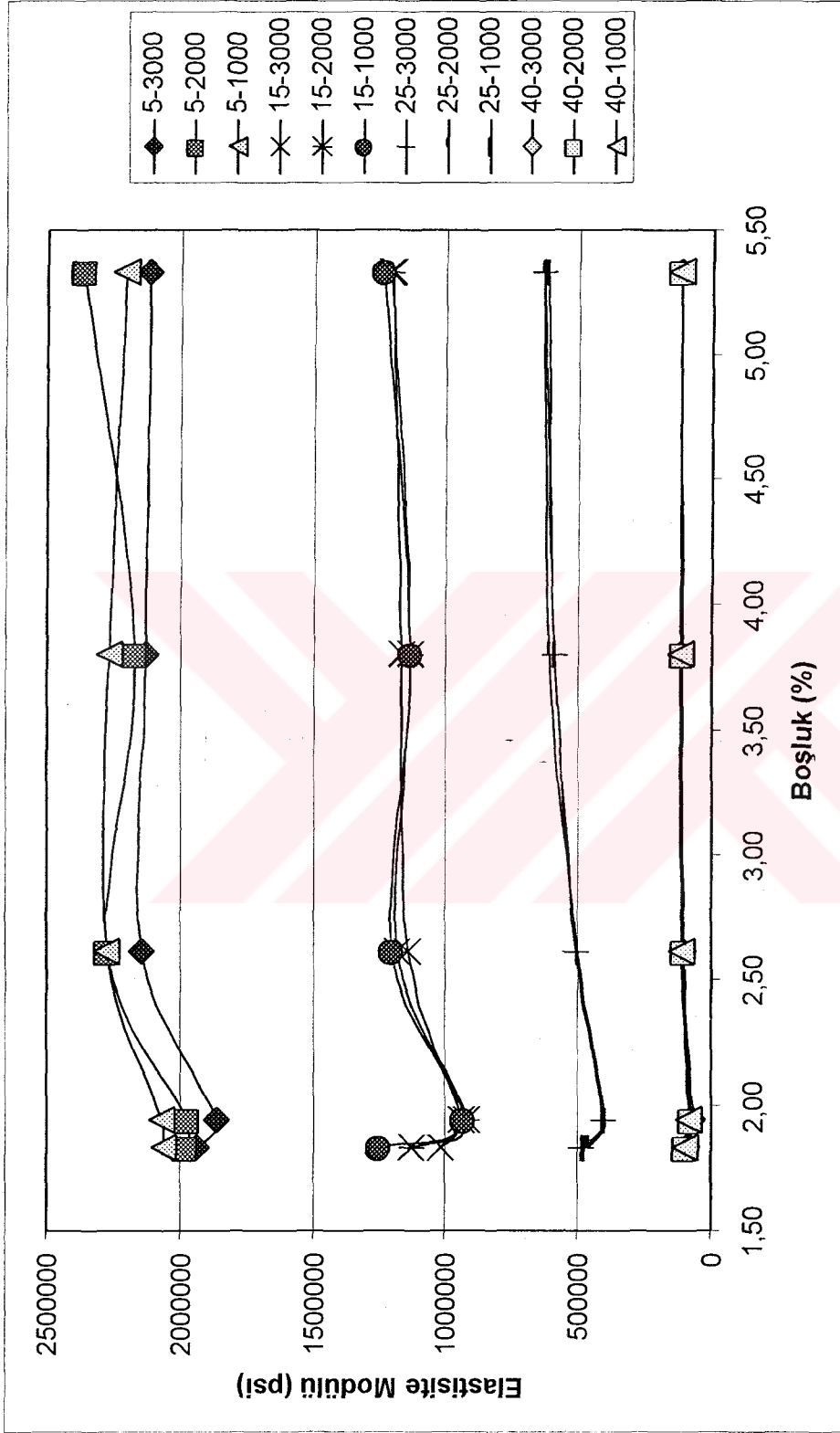
Karışım değişkenlerine ait olmak üzere farklı yükleme hızları için çizilen eğriler arasında büyük bir farklılık olmadığı görülmektedir. Yükleme hızındaki değişme karışımın elastisite modülünün artması veya azalması eğilimi üzerinde bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır.



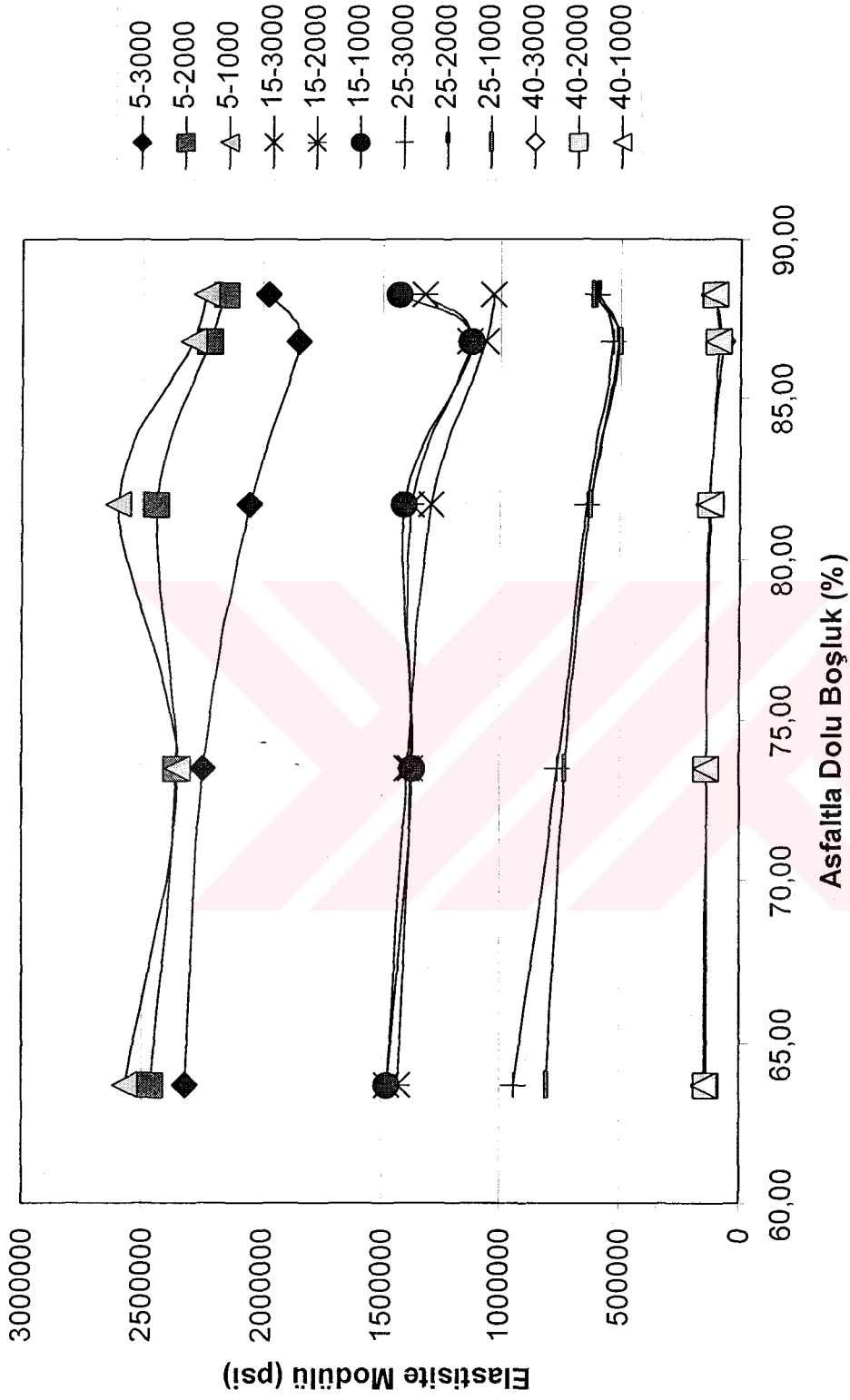
Şekil 6.20 Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)



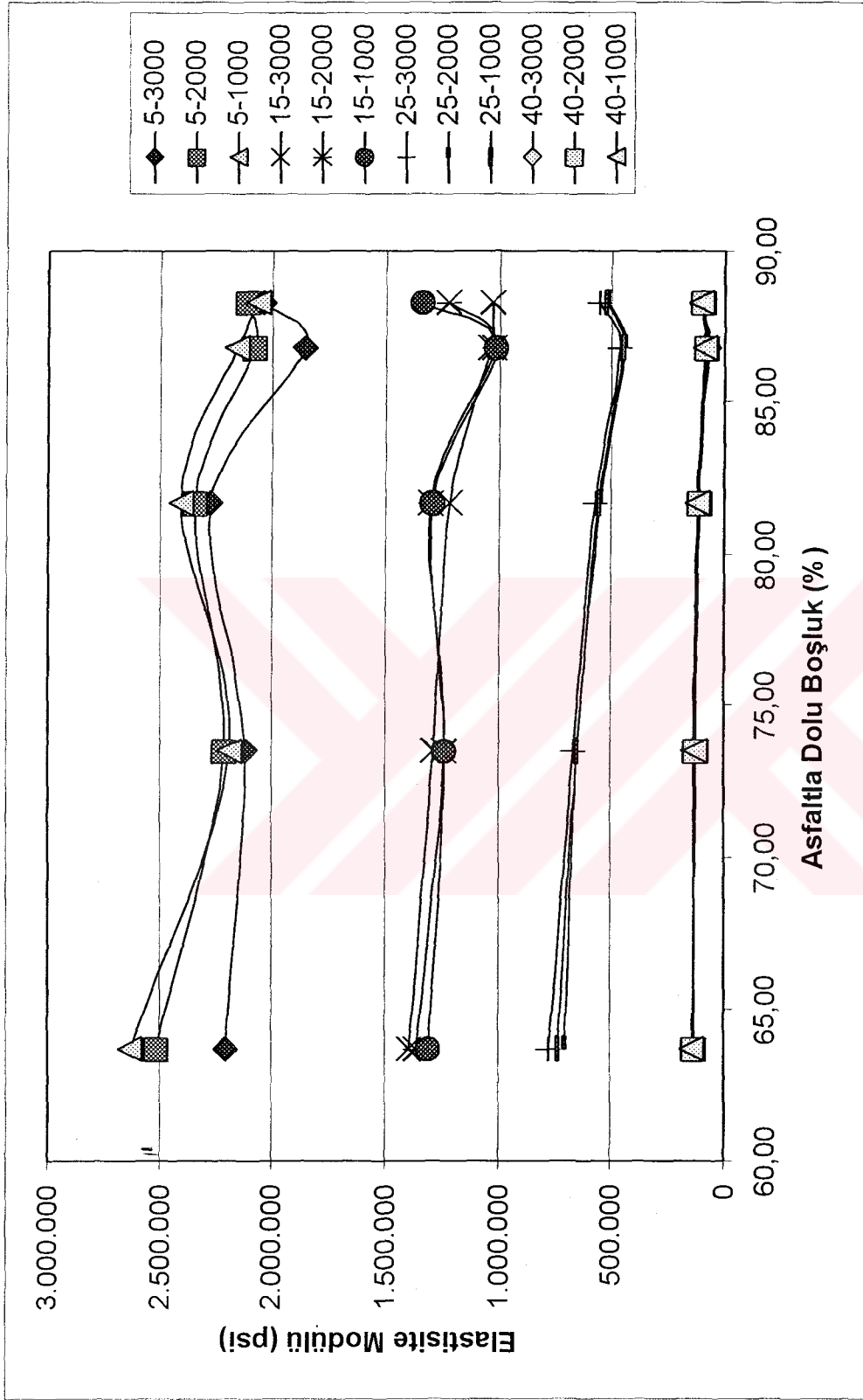
Şekil 6.21 Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)



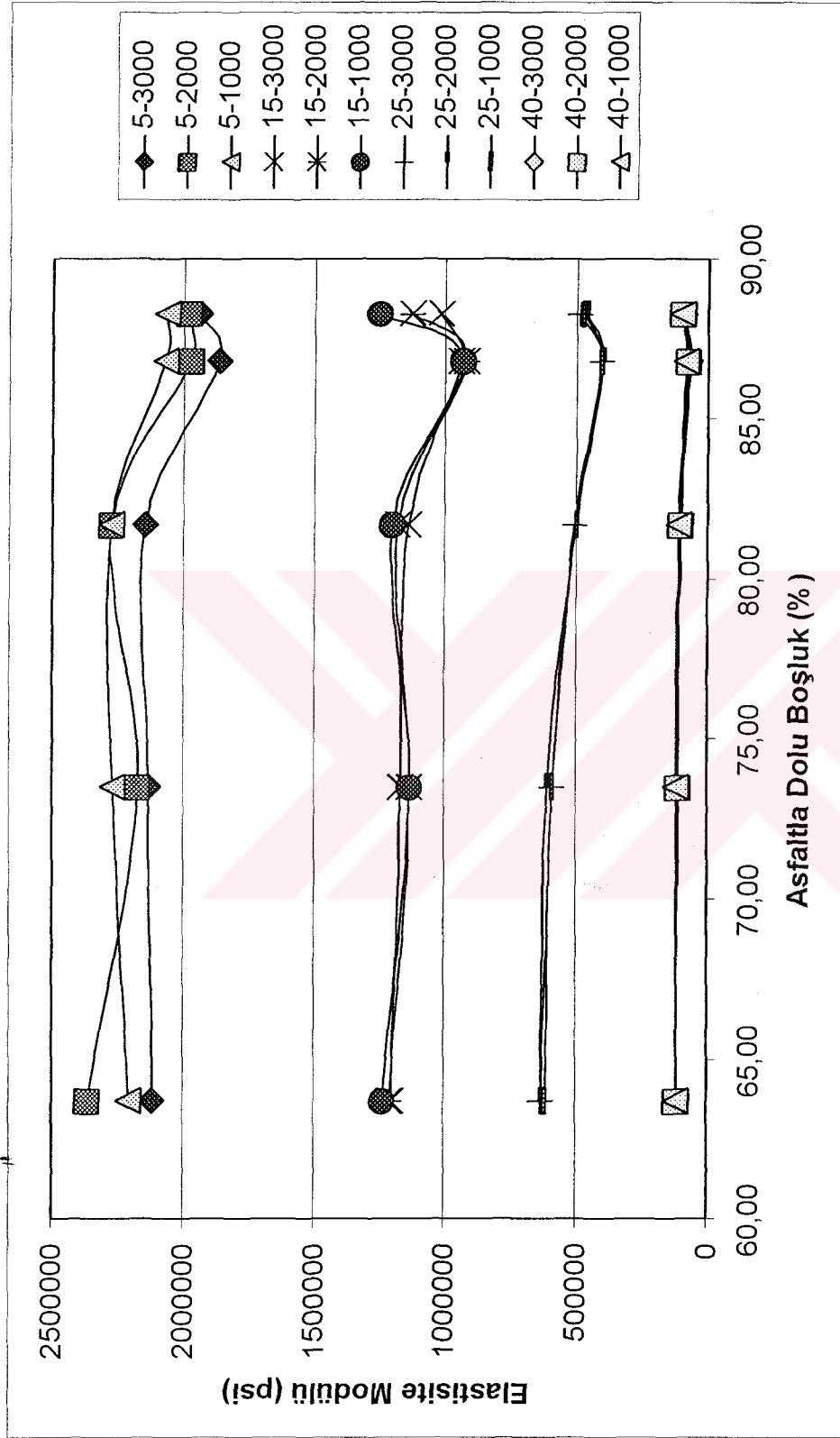
Şekil 6.22 Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)



Şekil 6.23 Asfalt la Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 40 ms)



Şekil 6.24 Asfaltla Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 60 ms)



Şekil 6.25 Asfaltla Dolu Boşluk-Elastisite Modülü İlişkisi (Yükleme Hızı 80 ms)

6.3.4.2 Yükleme Periyodu ve Hızının Elastisite Modülü Üzerine Olan Etkisi

Bu çalışmada, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği şekilde üç farklı yükleme periyodu (3000, 2000 ve 1000 ms) için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu yükleme periyotlarının elastisite modülü üzerinde olan etkisini değerlendirmek amacıyla, her bir sıcaklık ve yükleme hızı için farklı yükleme periyotlarında ölçülen en büyük ve en küçük elastisite modülleri birbirlerine bölünmüş ve Yükleme Periyodu Etkisi (YPE) katsayısı hesaplanmış ve bulunan değerler Çizelge 6.7’de verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken aşağıda verilen formülasyon kullanılmıştır.

$$YPE = \frac{\max Ei}{\min Ei}$$

YPE=Yükleme Periyodu etkisi

maxEi=Farklı Yükleme Periyotları için Sabit i sıcaklığı ve i yükleme hızında

ölçülen en büyük elastisite modülü

minEi=Farklı Yükleme Periyotları için Sabit i sıcaklığı ve i yükleme hızında

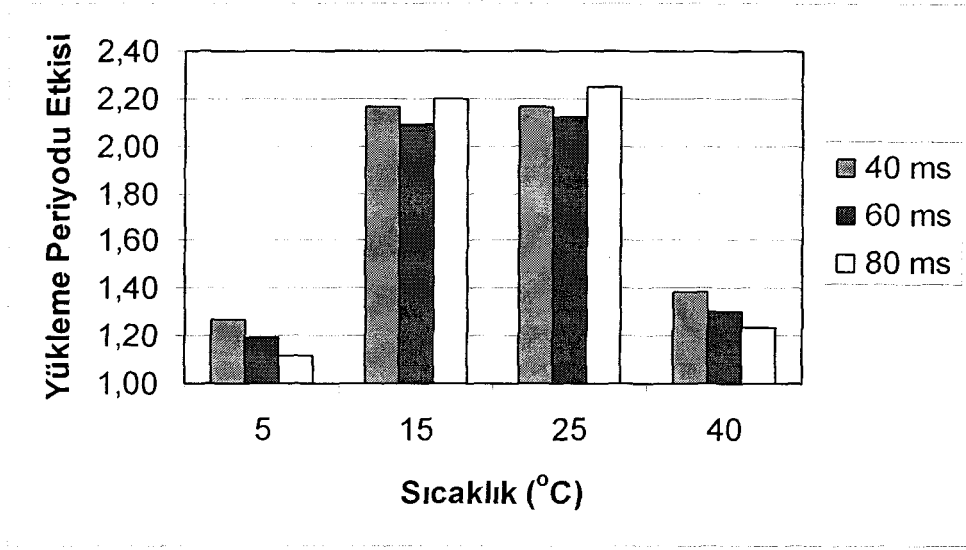
ölçülen en küçük elastisite modülü

Çizelge 6.7 Yükleme Periyodu Etkisi (YPE)

Yükleme Hızı (ms)	Sıcaklı (°C)			
	5	15	25	40
40 ms	1,27	2,17	2,17	1,39
60 ms	1,19	2,09	2,12	1,30
80 ms	1,12	2,20	2,25	1,24

Çizelge incelendiğinde yükleme periyodunun elastisite modülü üzerindeki etkisinin en az 5 °C sıcaklık ve 80 ms yükleme hızında 1,12 ve en fazla ise 25 °C sıcaklık ve 80 ms yükleme hızında 2,25 oranında etkilediği görülmektedir.

Ayrıca bu etkiyi daha iyi açıklaya bilmek amacıyla Şekil 6.26 hazırlanmıştır.



Şekil.6.26 Yükleme Periyodunun Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi

Şekil den de görülebileceği gibi yükleme periyodu 5 ve 40 °C sıcaklıklarda büyük bir etkiye sahip olmazken 15 ve 25 °C sıcaklıklarda elastisite modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

Bu çalışmada, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği şekilde üç farklı yükleme hızı (40, 60 ve 80 ms) için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu yükleme hızlarının elastisite modülü üzerinde olan etkisini değerlendirmek amacıyla, her bir sıcaklık ve yükleme hızı için farklı yükleme periyotlarında ölçülen en büyük ve en küçük elastisite modülleri birbirlerine bölünmüş ve Yükleme Hızı Etkisi (YHE) katsayısı hesaplanmış ve bulunan değerler Çizelge 6.8’de verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken aşağıda verilen formülasyon kullanılmıştır.

$$YHE = \frac{\max Ei}{\min Ei}$$

YPE=Yükleme hızı etkisi

maxEi=Farklı Yükleme Hızları için Sabit i sıcaklığı ve i yükleme periyodunda ölçülen en büyük elastisite modülü

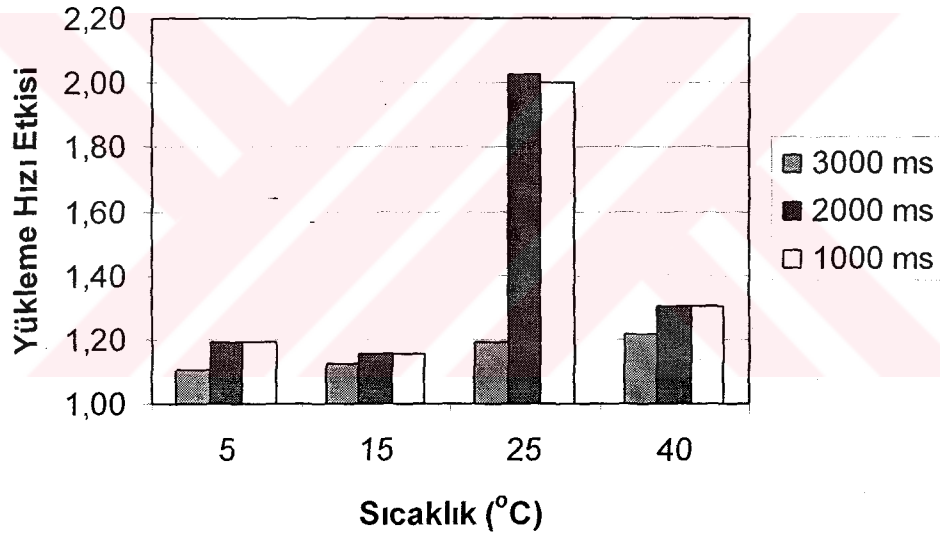
minEi=Farklı Yükleme Hızları için Sabit i sıcaklığı ve i yükleme periyodunda ölçülen en küçük elastisite modülü

Çizelge 6.8 Yükleme Hızı Etkisi (YHE)

Yükleme Periyodu	Sıcaklı (°C)			
	5	15	25	40
3000 ms	1,11	1,12	1,19	1,22
2000 ms	1,19	1,16	2,03	1,30
1000 ms	1,19	1,16	2,00	1,30

Çizelge incelendiğinde yükleme hızının elastisite modülü üzerindeki etkisinin en az 5 °C sıcaklık ve 3000 ms yükleme periyodunda 1,11 ve en fazla ise 25 °C sıcaklık ve 2000 ms yükleme periyodunda 2,03 oranında etkilediği görülmektedir.

Ayrıca bu etkiyi daha iyi açıklaya bilmek amacıyla Şekil 6.27 hazırlanmıştır.



Şekil.6.27 Yükleme Hızının Elastisite Modülü Üzerindeki Etkisi

Şekil den de görülebileceği gibi yükleme hızı 5ve 15 °C'de karışımın çok rijit, 40 °C'de ise üzerine gelen yüklerin uygulanma sürelerine karşı tepki gösterebilecek kadar elastik olmaması nedeniyle, söz konusu sıcaklıklarda yükleme hızı önemli bir etkiye sahip değilken 25 °C sıcaklıkta 2000 ve 1000 ms yükleme periyodunda etki katsayısı 2'nin üzerine çıkmaktadır.

6.3.5 Statik Sünme Deneyi

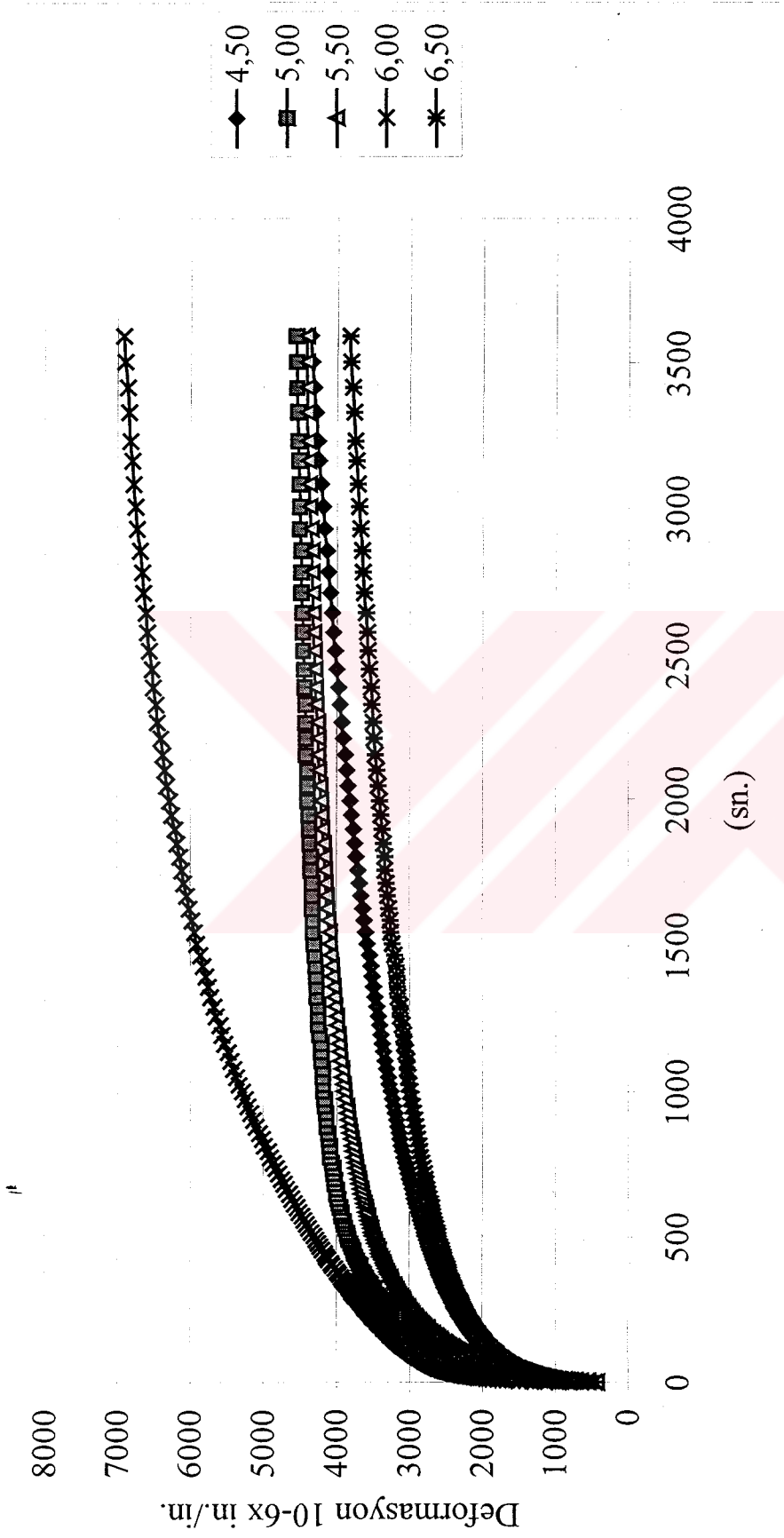
Asfalt betonu karışımlarının tekerlek izi oluşumuna karşı göstermiş oldukları performansı değerlendirmek amacıyla Tek Eksenli Statik Sünme Deneyi uygulanmıştır. Bu deney farklı bitüm muhtevalarında (% 4,5-5,0-5,5-6 ve 6,5) ve optimum bitüm muhtevasında katkılı ve geleneksel bağlayıcı (optAC ve optACv) ile hazırlanmış olan karışımlar üzerine yapılmıştır. Deney, Bölüm 5'te anlatıldığı şekilde uygulanmıştır. Deneyde toplam olarak 56 adet numune kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada kullanılan deney değişkenleri aşağıda verilmiştir.

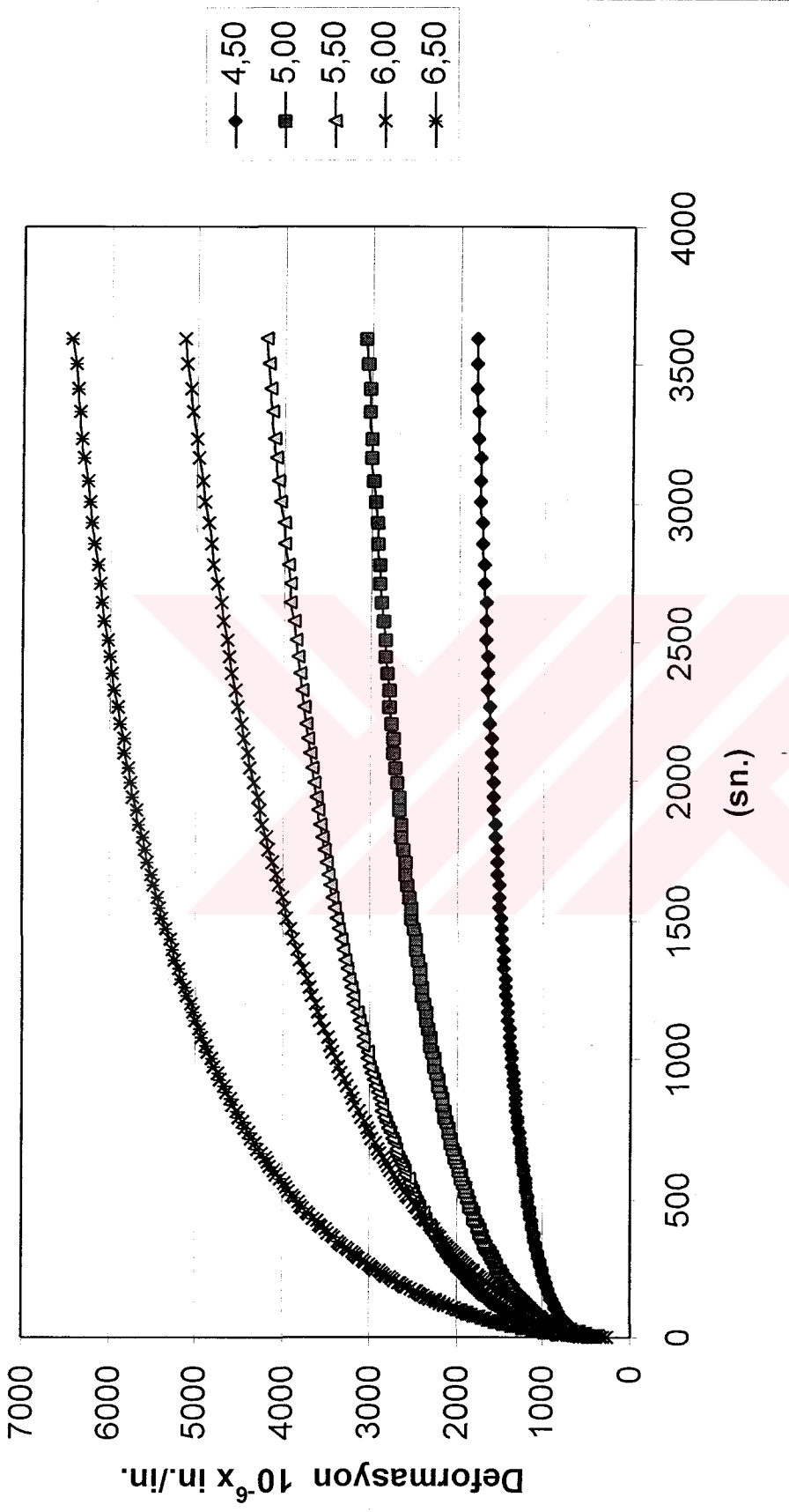
Tek Eksenli Basınç Yüğü :	250 kPa (36,25 psi-2,55 kg/cm ²)
Deney Sıcaklıkları :	5 – 15 – 25 - 40 °C
Yük Uygulama Süresi :	3600 sn
Yüksüz Süre :	3600 sn

Deneyde özet olarak, numune 3600 sn boyunca 250 kPa'lık basınç yüküne maruz bırakılmış ve bu süre boyunca oluşan deformasyonlar ölçülmüş ve kaydedilmiştir. 3600 sn yük uygulamasının ardından numune ilave olarak 3600 sn boyunca yüksüz bırakılmış ve 3600. Saniye sonunda geriye dönen deformasyon miktarı ölçülmüştür. Deneyden elde edilen sonuçlar Ek C'de Çizelge C.1 ve Çizelge C.2'de verilmiştir. Ayrıca herbir bitüm muhtevası için Sünme Modülü değerleri de hesaplanarak Çizelge C.3'de verilmiştir.

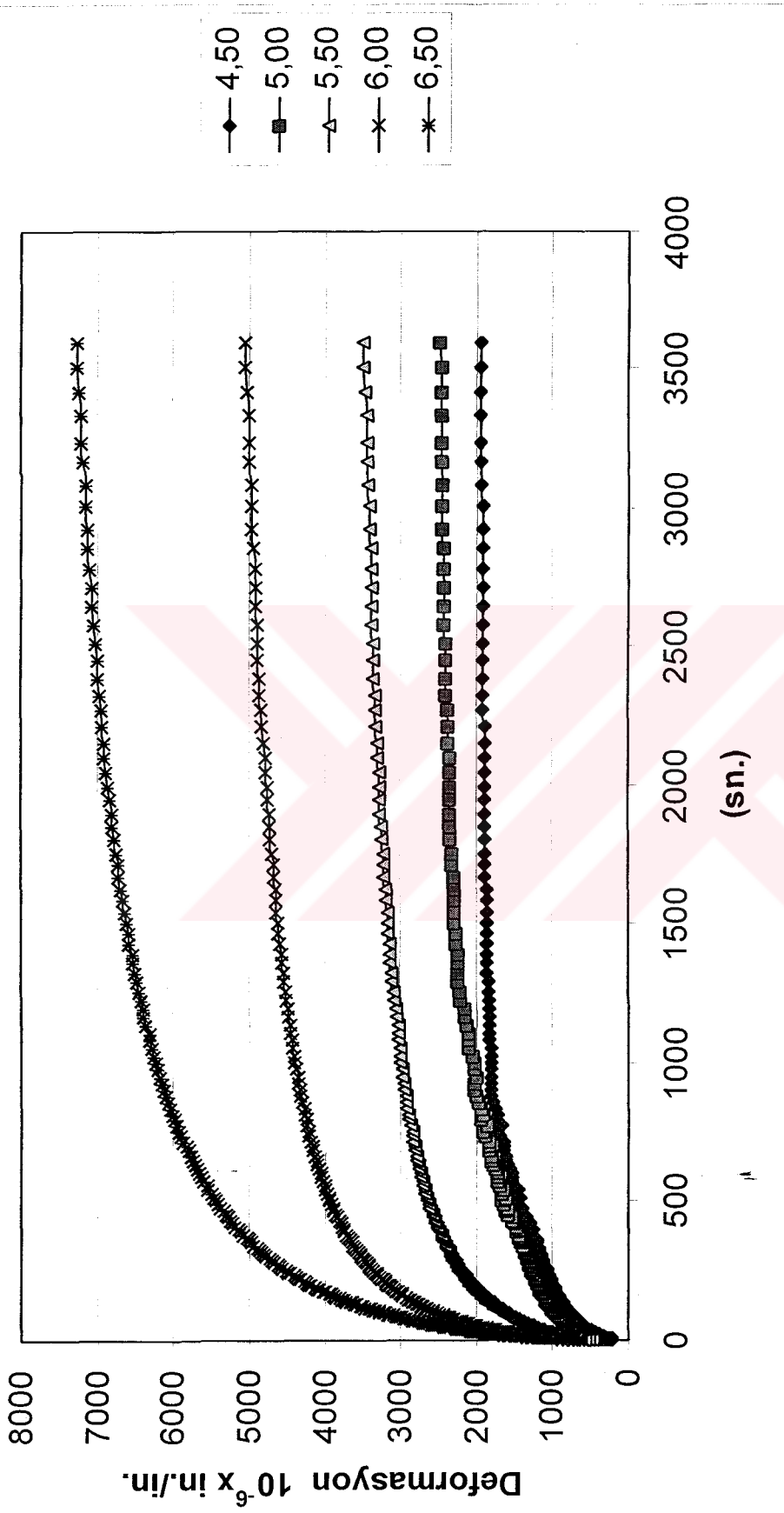
Deneyden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak farklı bitüm muhtevaları için deney boyunca oluşan deformasyon miktarları 5 °C sıcaklık için Şekil 6.28, 15 °C için Şekil 6.29, 25 °C için Şekil 6.30 ve 40 °C için ise Şekil 6.31'da çizilmiştir.



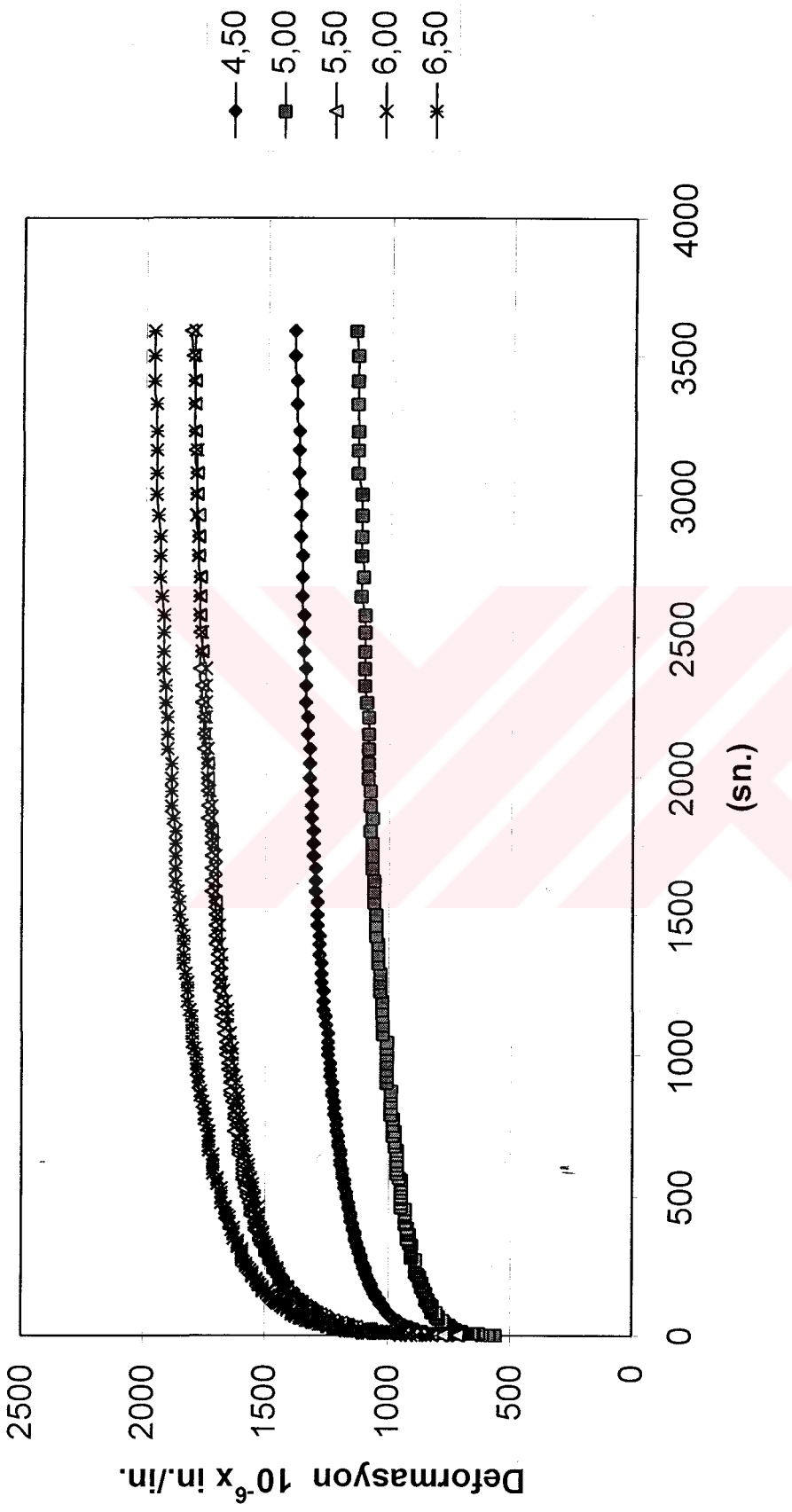
Şekil 6.28 Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (5 °C Sıcaklık)



Şekil 6.29 Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (15 °C Sıcaklık)



Şekil 6.30 Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (25 °C Sıcaklık)

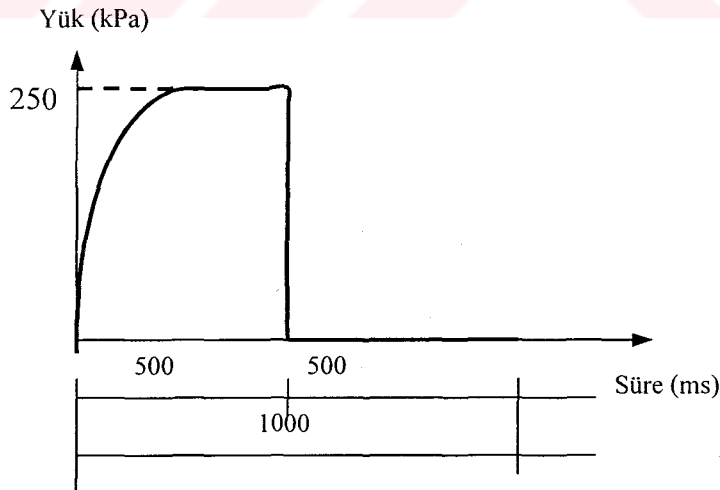


Şekil 6.31 Farklı bitüm muhtevaları için zaman-deformasyon ilişkisi (40 °C Sıcaklık)

Şekillerden de görülebileceği gibi yükün uygulamasının başlaması ile numunelerde ani bir deformasyon artışı meydana gelmekte ancak belirli bir süre sonra deformasyon oluşma hızı azalmaktadır. Karışım içerisindeki bitüm muhtevasının artması ile oluşan deformasyon miktarları artış göstermekte, başka bir deyişle bitüm muhtevasının artması karışımda tekerlek izi oluşma riskini artırmaktadır. Ayrıca düşük ve yüksek (5°C ve 40 °C) sıcaklıklarda karışım içerisinde oluşan deformasyon, bitüm miktarından bağımsız olarak değişmektedir.

6.3.6 Tekrarlı Sünme Deneyi

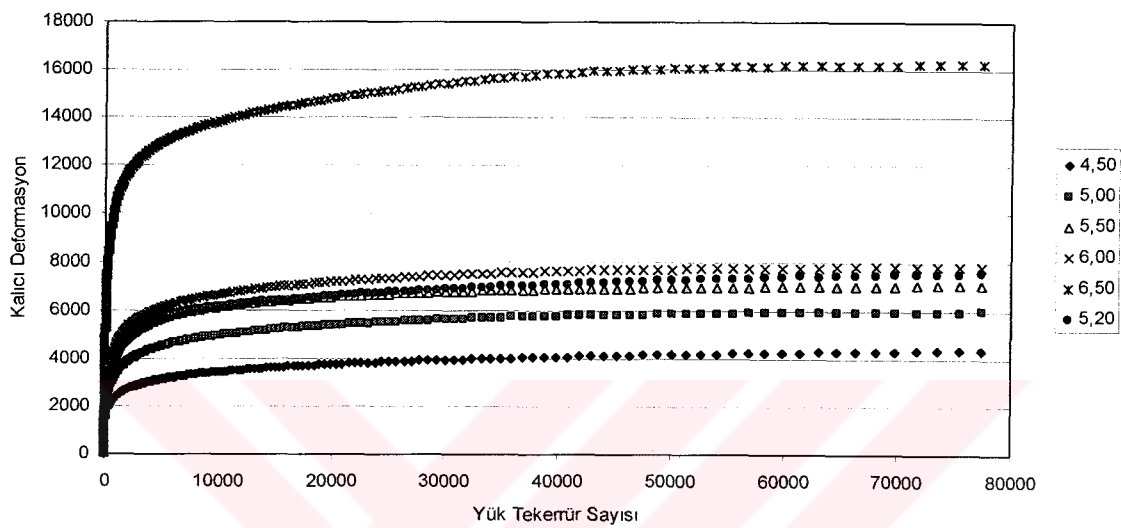
Bu deney, asfalt karışımlarının tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır (Alderson, 1995). Bu deneyde numuneler, 25 °C sıcaklıkta Şekil 6.32’de verildiği şekilde 1000 ms vuruş periyodu boyunca 500 ms yüklü ve 500 ms yüksüz olmak üzere 250 kPa’lık tek eksenli basınç yüküne en az 20 saat (72.000 yük tekrarı) boyunca maruz bırakılmış ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür.



Şekil 6.32 Tekrarlı Yük ve Uygulama Şekli

Deney statik sünme deneyinde olduğu gibi 5 farklı bitüm muhtevasında (% 4,5-5,0-5,5-6,0-6,5) ve katkılı ve katkısız karışımların optimum bitüm muhtevalarında (optAC-optACv)

yapılmıştır. Deneysel çalışma sırasında her bir bitüm muhtevası için 5 adet olmak üzere toplam 35 adet deney numunesi kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Ek D Çizelge D.1’de verilmiştir. Ayrıca deney sonucunda farklı bitüm muhtevaları için yük tekrür sayısı-kalıcı deformasyon eğrisi Şekil 6.33’te sunulmuştur.



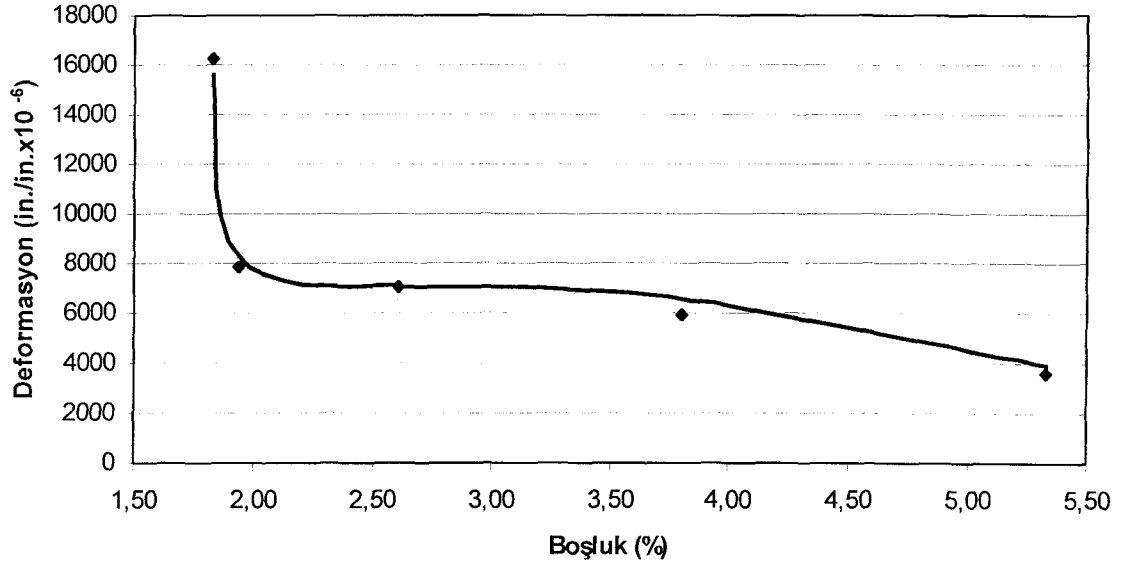
Şekil 6.33 Yük Tekrür Sayısı-Kalıcı Deformasyon İlişkisi

Karışımın bitüm,boşluk ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi ve 20. saat sonunda oluşan kalıcı deformasyon Çizelge 6.9’da gösterilmiştir.

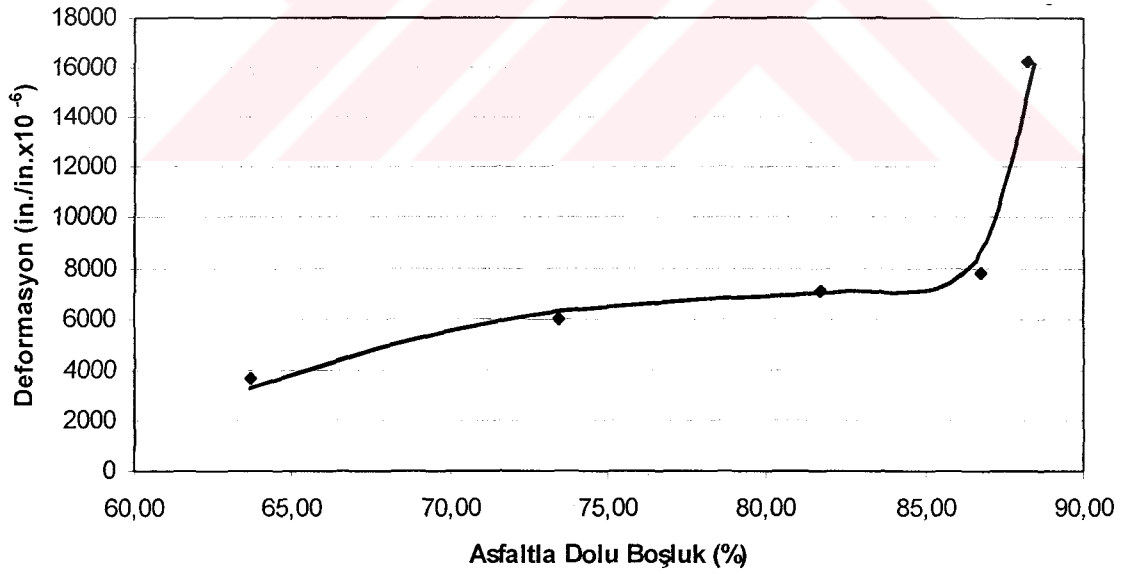
Çizelge 6.9 Karışım Değişkenleri ve 20. Saat Sonunda Oluşan Kalıcı Deformasyon

Pb %	V %	VFA %	VMA %	Deformasyon (in./in.x10 ⁻⁶)
4,50	5,33	63,70	14,69	3636
5,00	3,80	73,48	14,32	5958
5,50	2,61	81,69	14,27	7065
6,00	1,94	86,76	14,67	7809
6,50	1,83	88,25	15,54	16227

Karışımın boşluk yüzdesi ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 6.34 ve Şekil 6.35’te çizilmiştir.



Şekil 6.34 Boşluk-Kalıcı Deformasyon İlişkisi



Şekil 6.35 Asfaltla Dolu Boşluk-Kalıcı Deformasyon İlişkisi

Şekillerden de görüleceği üzere boşluk yüzdesinin yaklaşık 3,5 değerinden sonra deformasyonlarda bir azalma gözlenmektedir. Asfaltla Dolu Boşluk yüzdesinde ise 80 değerinden sonra deformasyonlarda ani bir artış oluşmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken boşluk için şartname sınır değerlerinin % 3-5 ve asfaltla dolu boşluk için bu değerlerin % 75-85 olduğudur.

6.4 Karışım Performanslarının Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan farklı bitüm muhtevalarındaki karışımların Elastisite Modülü Değerlerinin ve Sünme Modülü değerlerinin, karışımların rijitliği ve tekerlek izi oluşumu potansiyeli açısından değerlendirilmeleri yapılmıştır.

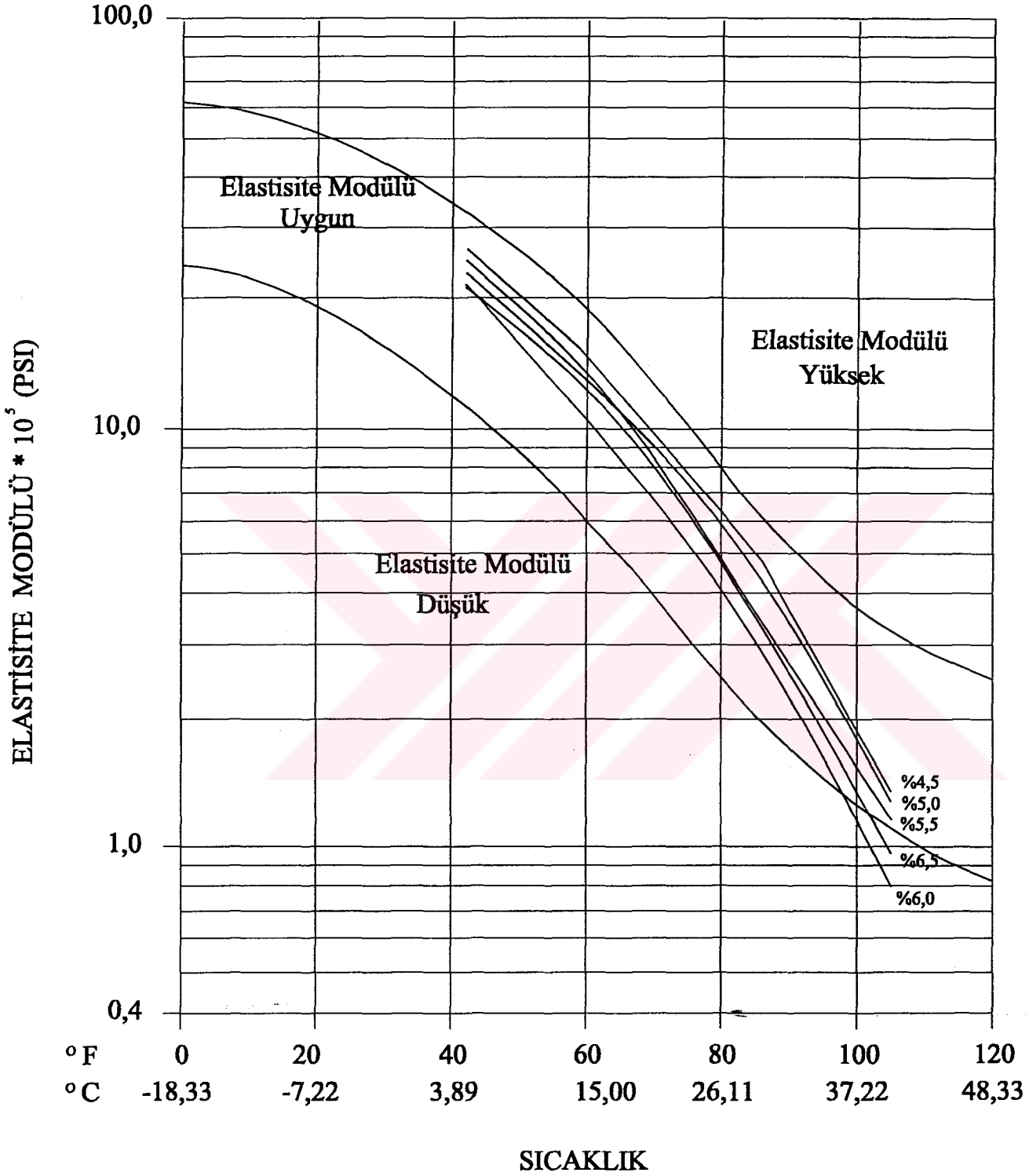
6.4.1 Elastisite Modüllerinin Değerlendirilmesi

Karışımların bitüm muhtevasına bağlı olarak istenilen rijitliğe sahip olup olmadıklarının değerlendirilmesinde AAMAS'de verilmiş olan nomoğraftan faydalanılmıştır. Verilen nomoğraf üzerine farklı sıcaklık ve bitüm muhtevalarında yapılan Dolaylı Çekme Deneyinden elde edilen elastisite modülü değerleri işlenmiştir (Şekil 6.36).

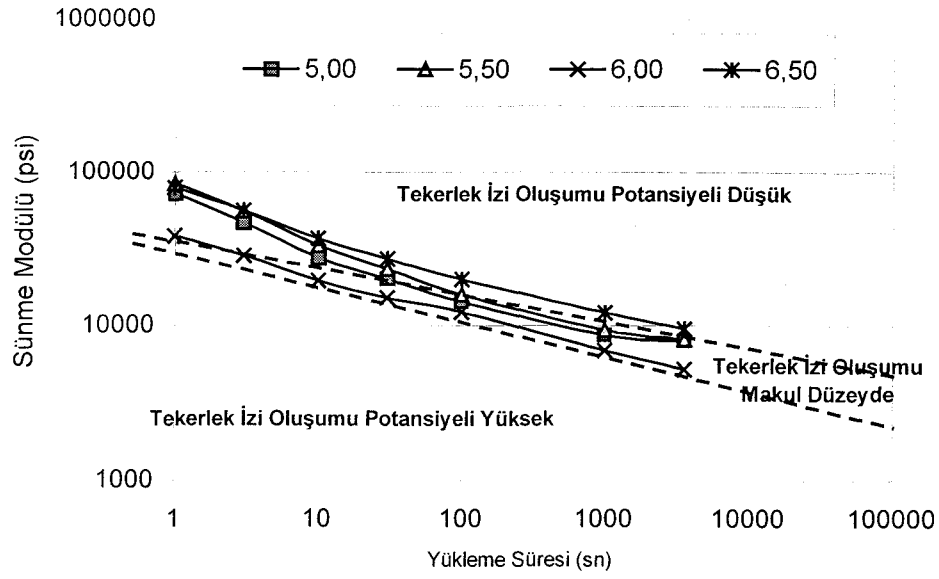
Şekil 6.36'nın incelenmesinden de görülebileceği gibi yüksek sıcaklıklarda (40 °C) bitüm muhtevasındaki artış ile birlikte karışımlar, düşük rijitlikleri nedeniyle eğrilerin dışında kalmaktadır. Ancak düşük sıcaklıklarda (5 °C) karışımların rijitlikleri artmakta ancak bu artışa rağmen uygunluk eğrileri arasında kalmaktadırlar.

6.4.2 Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyellerine Ait Değerlendirme

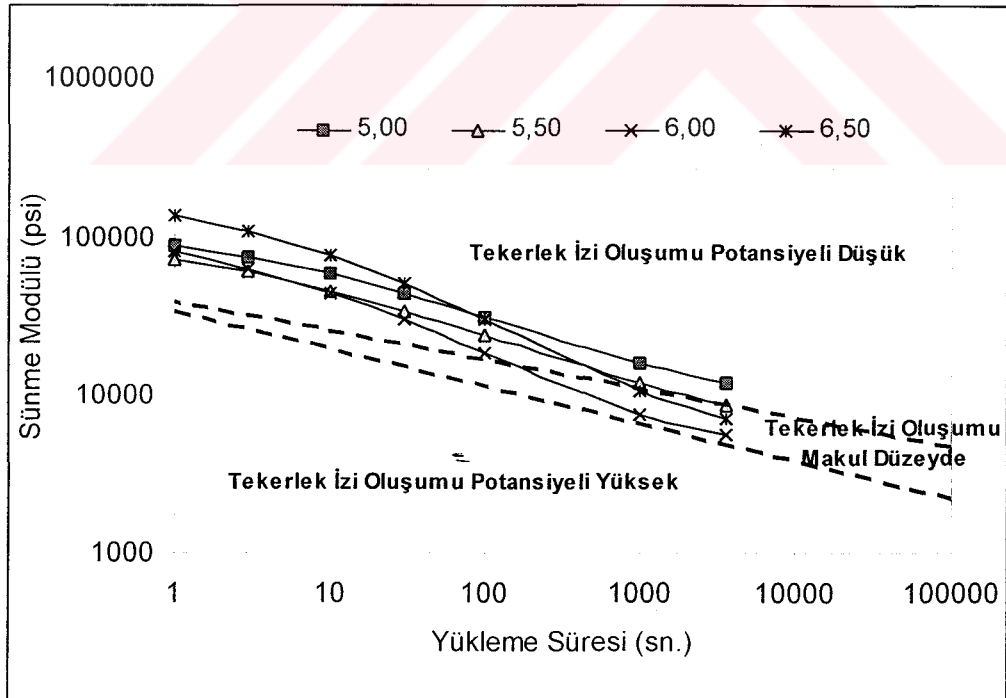
Karışımların bitüm muhtevasına bağlı uygun Sünme Modülü değerine sahip olup olmadıklarının değerlendirilmesinde AAMAS'de verilmiş olan nomoğraftan faydalanılmıştır. Verilen nomoğraf üzerine farklı bitüm muhtevalarında yapılan Statik Sünme Deneyinden elde edilen Sünme Modülü değerleri farklı sıcaklıklara göre işlenmiştir (Şekil 6.37-6.38-6.39-6.40)



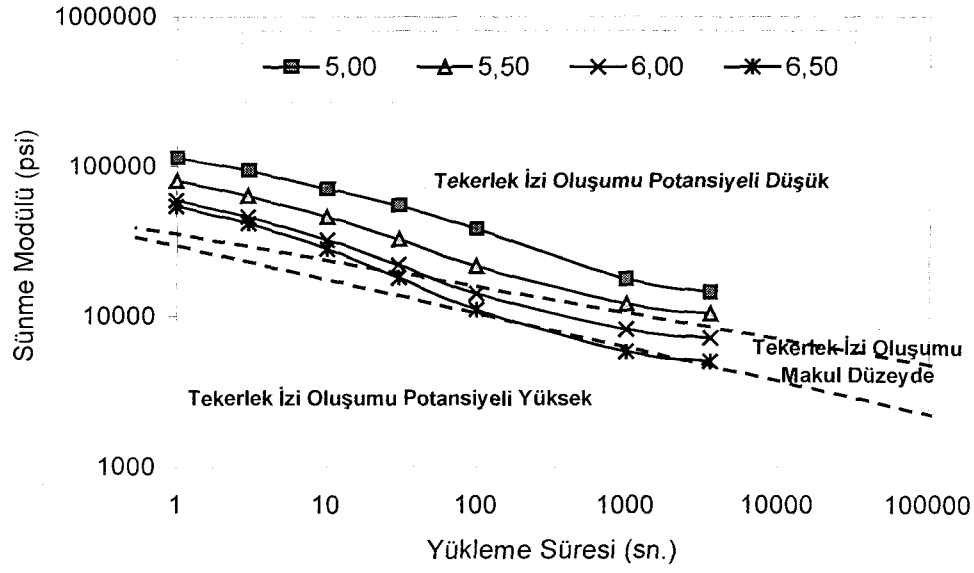
Şekil 6.36 Bitüm Oranlarına Göre Elastisite Modülü Değerlerinin Uygunluğu



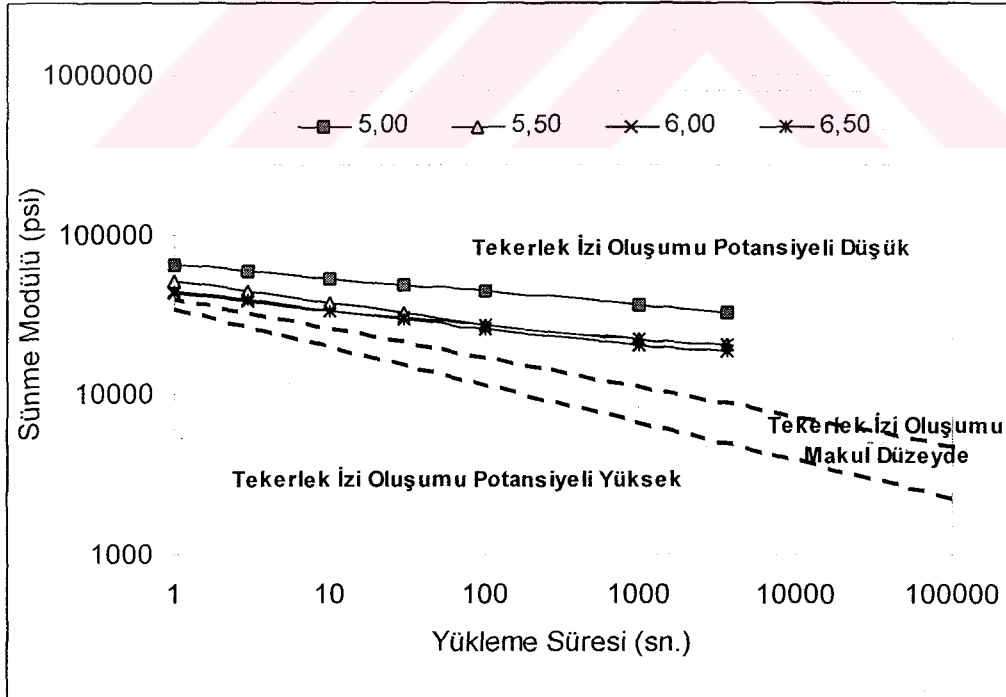
Şekil 6.37 Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri
(5 °C)



Şekil 6.38 Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri
(15 °C)



Şekil 6.39 Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (25 °C)



Şekil 6.40 Karışımların Bitüm Muhtevalarına Göre Tekerlek İzi Oluşumu Potansiyelleri (40 °C)

Şekillerin incelenmesinden de anlaşılacağı üzere karışımın, bitüm muhtevsındaki artış ile birlikte tekerlek izi oluşumuna karşı olan direnimi azalmaktadır. 4 farklı sıcaklık için Nomoğraflar incelendiğinde karışımların tekerlek izi oluşumu potansiyeli düşük olan bölgede kaldıkları görölmektedir.



7. TEKERLEK İZİ OLUŞUMU MODELİNİN KURULMASI VE KARIŞIM PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNE AİT BİR YÖNTEM

Bu çalışmada, Dolaylı Çekme Deneyi ve Dolaylı Çekme Mukavemeti deneylerinin sonuçlarından yararlanılarak karışımların yorulma ömürlerine ait bir değerlendirme yapılmakta ve çeşitli ülkelerde kullanılmakta olan yorulma ömrü tahmin modelleri arasından seçilen bazı modeller incelenerek ülkemiz koşullarına en uygun model belirlenmektedir. Ayrıca Statik ve Tekrarlı Sünme Deneyi sonuçlarından yararlanılarak bir tekerlek izi tahmini modeli kurulmaktadır.

Yapılan bu çalışmalardan yararlanılarak katkılı ve katkısız karışımların tekerlek izi oluşumuna ve yorulma dayanımına ilişkin bir yöntem verilmektedir.

7.1 Tekerlek İzi Oluşumu Modelinin Kurulması

Tekrarlı dingil yükleri altında asfalt betonu karışımında oluşan tekerlek izi oluşumunu (kalıcı deformasyonlar) tahmin etmek amacıyla; farklı bitüm muhtevalarında hazırlanan karışımlara uygulanan Statik Sünme ve Tekrarlı Sünme deneyi sonuçlarından yararlanılarak bir model kurulmuştur.

Farklı bitüm muhtevalarında hazırlanan karışımlarda tekrarlı yükler nedeniyle oluşan kalıcı deformasyon değerleri Şekil 6.33'de gösterilmiştir. Şekil 6.33'ün incelenmesinden de görülebileceği gibi yük tekerrürü-deformasyon arasında;

ϵ_p : Kalıcı deformasyon (μ)

N : Yük tekerrür sayısı

A, B : Sabitler olmak üzere,

$\epsilon_p = A * \ln(N) - B$ şeklinde bir matematiksel ilişkinin var olduğu görülmektedir. Bu bağıntıda yer alan A ve B katsayılarının belirlenmesi için regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi sonucunda elde edilen A ve B katsayıları ve yapılan regresyon analizi

çalışmasının deneyden bulunan değerleri ne derecede doğru yansıttığı hakkında fikir veren Korelasyon Katsayıları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Yük Tekerrür Sayısı-Kalıcı Deformasyon
Regrasyon Analizi Sonuçları

Bitüm (%)	Regresyon Katsayıları		Korelasyon Kts. R^2
	A	B	
4,50	334,60	331,4	0,95
5,00	609,90	772,4	0,99
5,50	810,88	1529,5	0,98
6,00	873,16	1532,1	0,99
6,50	1633,20	1222,0	0,99
5,26	702,76	1114,4	0,99
5,20	798,52	1268,6	0,99

Çizelge 7.1’den de görüleceği gibi yük tekerrürü-deformasyon arasında yeteri derecede yakın bir ilişki bulunmaktadır.

Yukarıda verilen bağıntı ile bazı karışım değişkenleri (PB:ağırlıkça bitüm %’si , V:boşluk, VFA:asfaltla dolu boşluk, VMA:mineral agregası içerisindeki boşluk ve CM:Statik Sünme Deneyinden elde edilen 25 °C sıcaklıkta 3600. Saniyedeki Sünme Modülü) arasındaki ilişkiyi bulmak amacıyla kullanılan bağımsız değişkenler Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Model Çalışmasında Kullanılan Bağımsız Değişkenler

PB (%)	V (%)	VFA (%)	VMA %	CM (psi)
4,50	5,33	63,70	14,69	18594,1
5,00	3,8	73,48	14,32	14527,2
5,50	2,61	81,69	14,27	10413,6
6,00	1,94	86,76	14,67	7178,8
6,50	1,83	88,25	15,54	4987,6
5,26	3,3	76,50	14,29	12038,5
5,20	3,1	78,00	14,31	13766,1

Ayrıca, çalışmada kullanılan değişkenlere ait korelasyon matrisi de Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3 Korelasyon Matrisi

	PB (%)	V (%)	VFA (%)	VMA %	CM (psi)
PB (%)	1,00				
V (%)	0,92	1,00			
VFA (%)	0,95	0,99	1,00		
VMA (%)	0,67	0,35	0,42	1,00	
CM (psi)	0,98	0,94	0,97	0,58	1,00
A	0,98	0,88	0,91	0,75	0,95
B	0,66	0,88	0,85	0,65	0,72

Model çalışmasında STORM paket programından yararlanılarak katlı regresyon analizi yapılmıştır. Katlı regresyon analizinde, bağımlı değişkenler olan A ve B ile bağımsız değişkenler arasında;

$$A = f(PB, V, VFA, VMA, CM)$$

$$B = f(PB, V, VFA, VMA, CM)$$

gibi bir ilişkinin olduğu kabul edilmiştir. Yapılan regrasyon analizi sonucunda ise;

$$A=f(PB, VFA)$$

$$B= f(PB, CM)$$

şeklinde olduğu bulunmuştur. Bu sonuca göre, A ve B katsayılarına ait denklemler;

$$A = - 2912,44 - 971,9476 * PB + 118,6612 * VFA$$

$$B= - 8011,84 + 1398,469 * PB + 0,111148 * CM$$

A : Kalıcı Deformasyon-Yük tekerrürü ilişkisi çarpan katsayısı

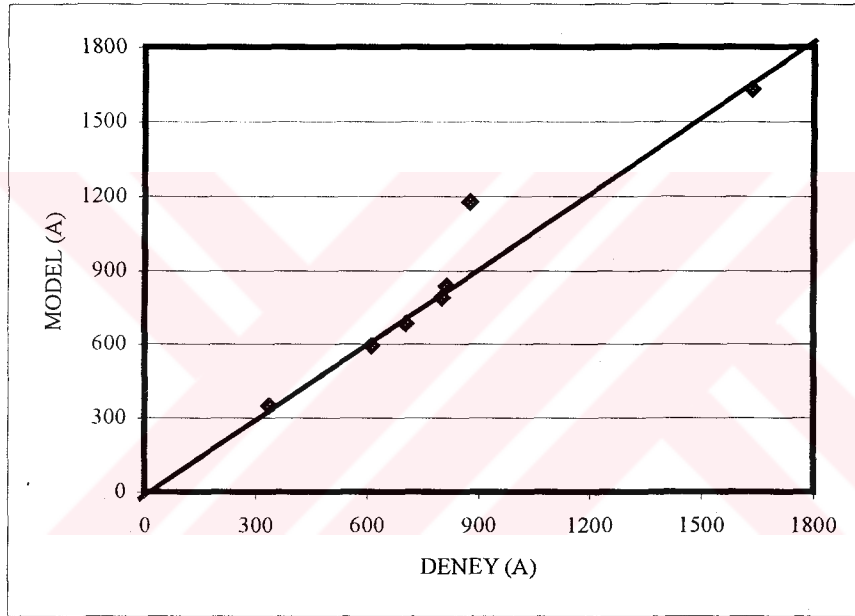
B : Kalıcı Deformasyon-Yük tekerrürü ilişkisi sabiti

PB : Bitüm Yüzdesi (4,5 – 6,5)

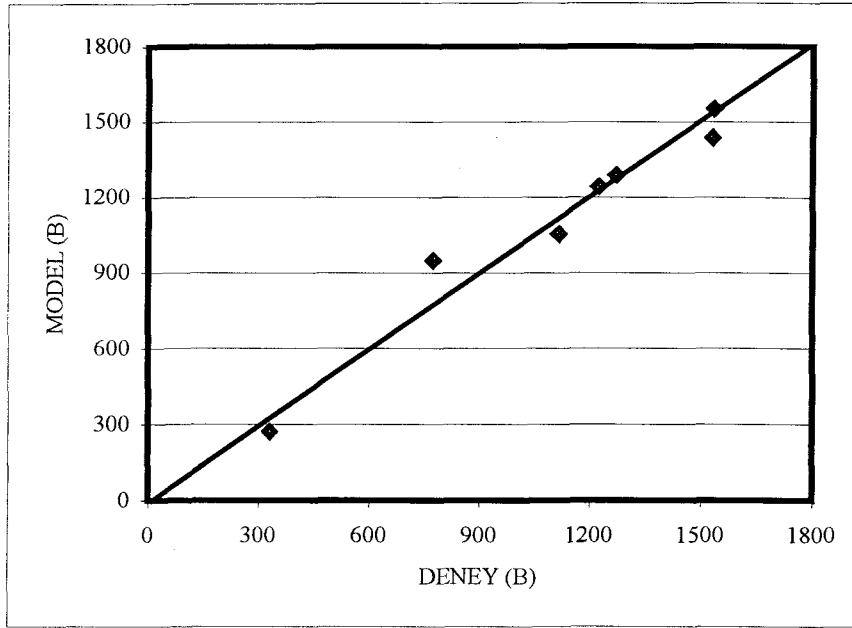
VFA : Asfaltla Dolu Boşluk (%)

CM : 3600. Saniye sonundaki Statik Sünme Modülü (psi)

korelasyon katsayıları ise A için $r^2=0,95$ ve B için ise $r^2=0,99$ olarak bulunmuştur. Yapılan değerlendirmelerden modelden hesaplanan ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen A ve B katsayılarının uygunluğunu göstermek amacıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 çizilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi eğer deneyden bulunan ve hesaplanan değerler arasında tam bir ilişki olsaydı tüm değerler şekillerde çizilen 1 diyagonal çizgisi üzerinde yer alacaktı, ancak burada değerler diyagonal çizgiye alt ve üst bölgelerde belirli uzaklıklarda yer almaktadırlar. Bu aşama için bu kadarlık bir yakınsaklık yeterli görülmektedir.



Şekil 7.1 Model ve Deneyden Bulunan A Değerleri Arasındaki İlişki



Şekil 7.2 Model ve Deneyden Bulunan B Değerleri Arasındaki İlişki

Modelden hesaplanan ve deneylerden bulunan kalıcı deformasyon-yük tekerrür sayısı ilişkisini veren bağıntılar Çizelge 7.4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Regresyon ve Deneyden Bulunan Yorulma Denklemleri

Bitüm (%)	Denklemler	
	Deneyden	Model
4,50	$\epsilon_p = 334,60 * \ln(N) - 331,7$	$\epsilon_p = 347,97 * \ln(N) - 272,51$
5,00	$\epsilon_p = 609,90 * \ln(N) - 772,41$	$\epsilon_p = 595,17 * \ln(N) - 947,05$
5,50	$\epsilon_p = 810,88 * \ln(N) - 1529,5$	$\epsilon_p = 837,19 * \ln(N) - 1435,28$
6,00	$\epsilon_p = 873,16 * \ln(N) - 1532,1$	$\epsilon_p = 1176,88 * \ln(N) - 1550,92$
6,50	$\epsilon_p = 1633,20 * \ln(N) - 1222,0$	$\epsilon_p = 1632,57 * \ln(N) - 1241,75$
OptAC	$\epsilon_p = 702,76 * \ln(N) - 1114,40$	$\epsilon_p = 682,16 * \ln(N) - 1052,70$
OptACv	$\epsilon_p = 798,52 * \ln(N) - 1268,6$	$\epsilon_p = 790,27 * \ln(N) - 1289,01$

Çizelge incelenirse denklemlerin çarpan katsayılarında bir yükselme ve karışımlarda oluşan başlangıç deformasyonunun bir göstergesi olan sabit katsayı ise %6 bitüm oranında en büyük değerine ulaşmaktadır.

7.2 Seçilen Yorulma Modellerinden Bu Çalışma Koşullarına Uyan Modelin Tespiti

Karışımların tekrarlı yükler altındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş olan Yorulma Modelleri araştırılmış ve bu modeller ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5’de verilmiştir.

Bu bölümde, çalışmadan elde edilen deney sonuçları kullanılarak bu çalışma koşullarına (uygulanan deney yöntemleri açısından) uygun modelin tespiti çalışması yapılmıştır. Değerlendirmede; Nottingham Araştırmacıları, SHELL, Asphalt Institute ve AAMAS tarafından geliştirilmiş olan modeller kullanılmıştır.

Karışımların tekrarlı yükler altındaki davranışları;

$$Nf = K * \varepsilon_t^{-n}$$

Nf : Bozulmaya neden olan yük tekerrür sayısı

K, n : regresyon katsayıları

ε_t : Başlangıç deformasyonu

denklemini ifade edilmektedir. Uygun modelin belirlenmesinde öncelikli olarak, modellerin uygun sonucu verip vermedikleri (makul sonuçlar) konusunda ön bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda Asphalt Institute tarafından geliştirilmiş olan modelin çok yüksek yük tekerrürü sayıları verdiği (99 milyar tekerrür gibi) belirlendiğinden daha sonraki değerlendirme aşamalarında incelemeye dahil edilmemiştir.

Diğer modellerin uygunluklarının tespitinde ise; model girdileri olarak deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılmış ve yukarıda verilen bağıntıda yer alan **K** ve **n** regresyon katsayıları her bir bitüm muhtevası için hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplardan elde sonuçlar Çizelge 7.5’de verilmiştir.

Çizelge 7.5 K ve n Regresyon Katsayıları

Bitüm (%)	Nottingham		Shell		AAMAS	
	n	K	n	K	n	K
4,5	0,24035	295048,77	0,552688	278439,7	-0,08860	19771868,7
5	0,23533	296706,48	0,528312	280006,9	-0,12666	27994657,2
5,5	0,23154	297965,34	0,496781	282047,3	-0,19642	52955170,0
6	0,22868	298917,91	0,471827	283672,5	-0,29436	129580837,7
6,5	0,22649	299648,44	0,452902	284911,4	-0,22421	68257454,2
Katkısız	0,23366	297261,86	0,510472	281159,5	-0,10183	22312465,3
katkılı	0,23453	296973,47	0,53057	279861,4	-0,17448	43334888,8

Çizelge 7.5 incelenirse **K** katsayılarının tüm modellerde pozitif olduğu görülmekte, **n** katsayısı ise Nottingham Araştırmacıları ve Shell tarafından geliştirilen modeller için pozitif (+), AAMAS'de ise negatif (-) değer almaktadır. Ancak modelde **n** katsayısının pozitif değer alması gerekmektedir. Bu nedenle uygun modeller olarak **Nottingham** ve **Shell** tarafından geliştirilen modeller tesbit edilmiştir.

7.3 Karışım Performanslarının Değerlendirme Yöntemi

Karışımın uzun dönemli davranışını tesbit etmek büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle bu bölümde karışımın uzun dönemli davranışının (tekerlek izi ve yorulma) ülkemiz koşullarında değerlendirilmesine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemin uygulanmasına bir örnek olmak üzere Vestoplast katkı malzemesi (optACv) ile katkısız karışıma (optAC) ait bir çalışma verilmiştir.

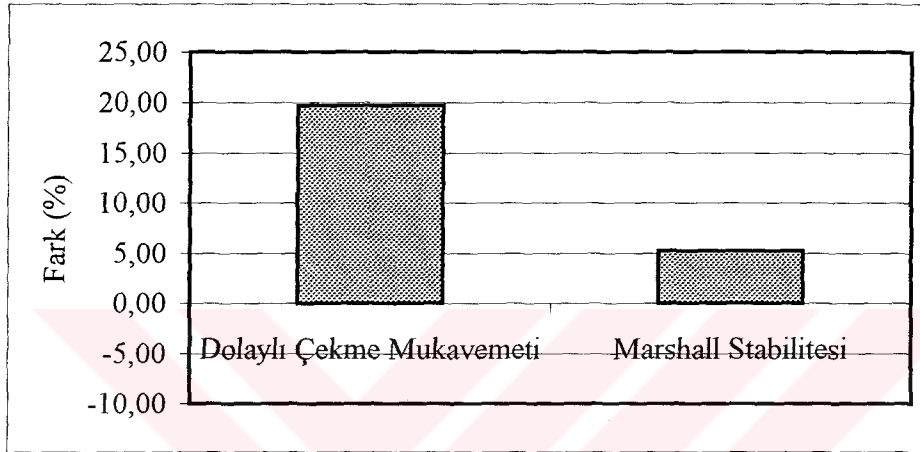
7.3.1 Karışım Stabilitelerine Ait Değerlendirme

Katkılı ve katkısız karışımların stabilite bakımından değerlendirilmesi amacıyla Marshall Tasarım Deneyi sonucunda tesbit edilen optimum bitüm muhtevasında hazırlanan numunelere (opt AC, opt ACv) Marshall Stabilitesi ve Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 7.6'da verilmiştir. Çizelge'ye ayrıca stabilite değerleri arası farklılık da ilave edilmiştir. Ayrıca stabilite değerleri arası farklılığın grafik olarak gösterilmesi amacıyla Şekil 7.3 çizilmiştir.

Çizelge 7.6 Katkılı ve Katkısız Karışım Stabiliteleri

		katkısız	katkılı	F* (%)
Dolaylı Çekme Mukavemeti	Çekme Deformasyonu ($\mu\epsilon$)	103,51	84,06	19,73
	Basınç Deformasyonu ($\mu\epsilon$)	169,98	138,04	
	Mukavemet (psi)	114,51	137,10	
Marshall	Stabilite (kg)	1150	1210	5,22
	Akma (mm)	3,10	3,30	

* $F = \text{katkılı} \times 100 / \text{katkısız} - 100$

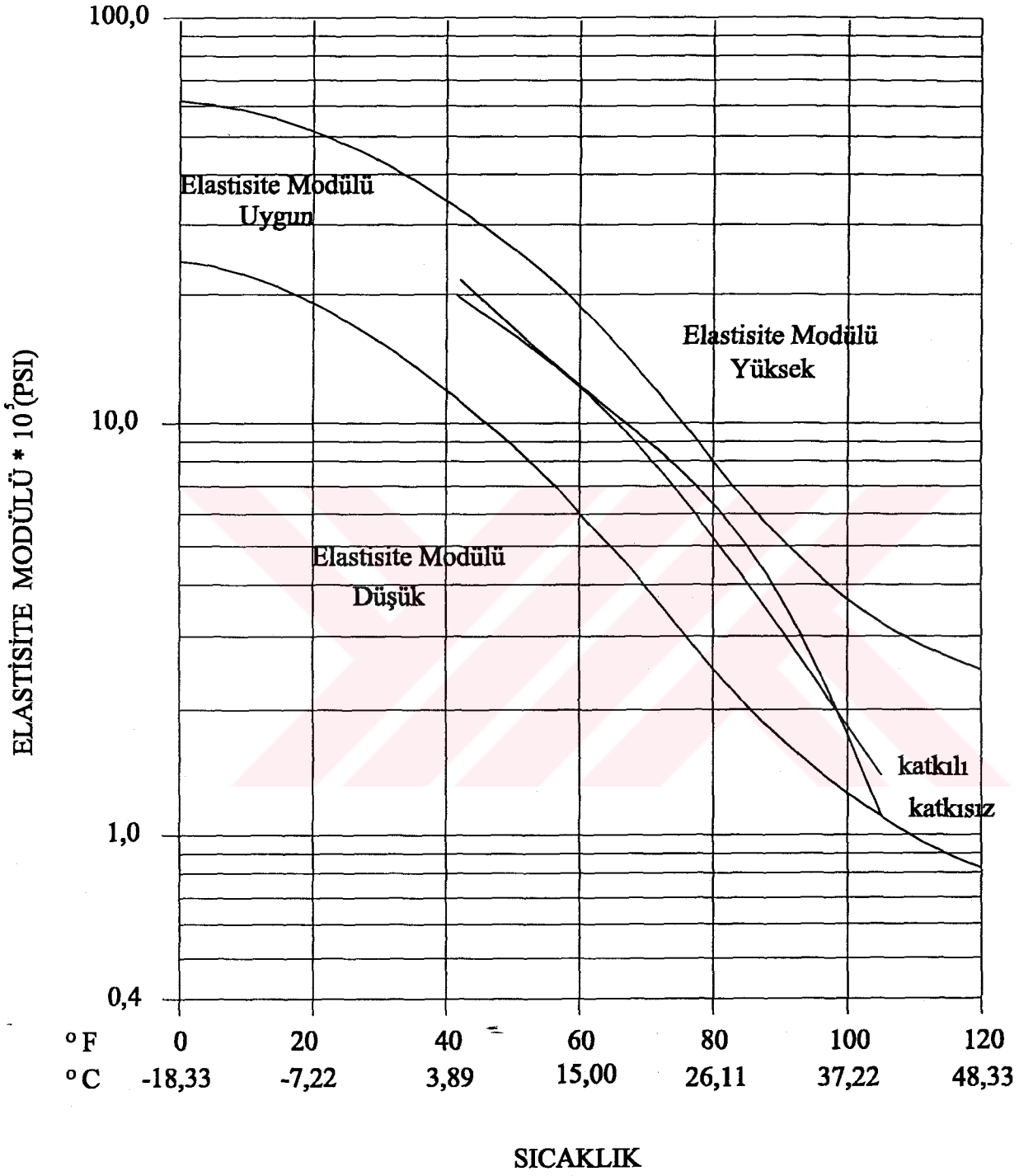


Şekil 7.3 Stabilitate Değerleri Arası farklılık

Katkılı karışımın Marshall Stabilitate değeri 1210 iken bu değer katkısız karışım için 1150 olmaktadır. Ayrıca katkılı karışım stabilite bakımından katkısız karışıma nazaran daha iyi bir performans sergilemektedir.

7.3.2 Karışımın Esneklik ve Yorulma Bakımından Değerlendirilmesi

Hazırlanan karışımların esneklikleri bakımından değerlendirilmesinde AAMAS'de tanımlanan nomoğraftan yararlanılmıştır. Bu amaçla nomoğraf üzerine katkılı ve katkısız karışıma ait değerler işaretlenerek karışımların esneklikleri bakımından bir değerlendirme yapılmıştır (Şekil 7.4).



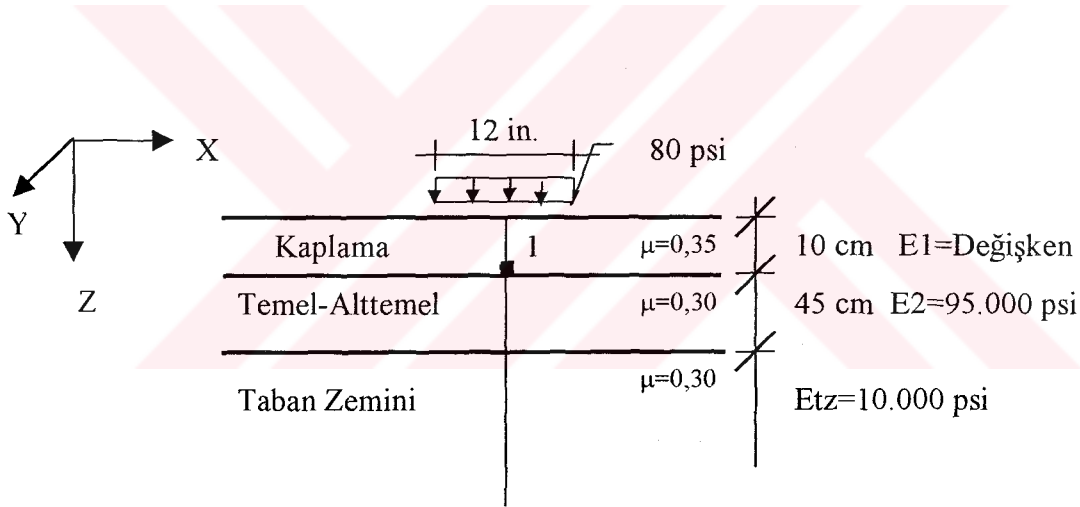
Şekil 7.4 Katkılı ve Katkısız Karışımların Elastisite Modülü Değerlerinin Uygunluğu

Karışımların yorulma direnimlerini tesbit etmek amacıyla;

$$Nf = K * \varepsilon_t^{-n}$$

bağıntısından yararlanılmış ve karışımların yorulma ömürlerini tesbit etmek amacıyla Nottingham ve Shell tarafından geliştirilen modellerden elde edilen K ve n değerleri kullanılmış ve her iki model için ayrı ayrı olmak üzere katkılı ve katkısız karışımların ömürleri hesaplanmıştır.

Karışımlar için Başlangıç Deformasyonu (ε_t), Şekil 7.5’de verilen üstyapı kesitinde kaplama tabakasının tabanında oluşan (1 noktası) yanal deformasyonun (X, Y eksen) ELSYM5 (Elastic Layered System with Normal Loads) paket programı kullanılarak hesaplanmasından elde edilmiştir. Elastisite modülü değerleri (E) 25 °C sıcaklıkta yapılan dolaylı çekme deneyinden alınmıştır.

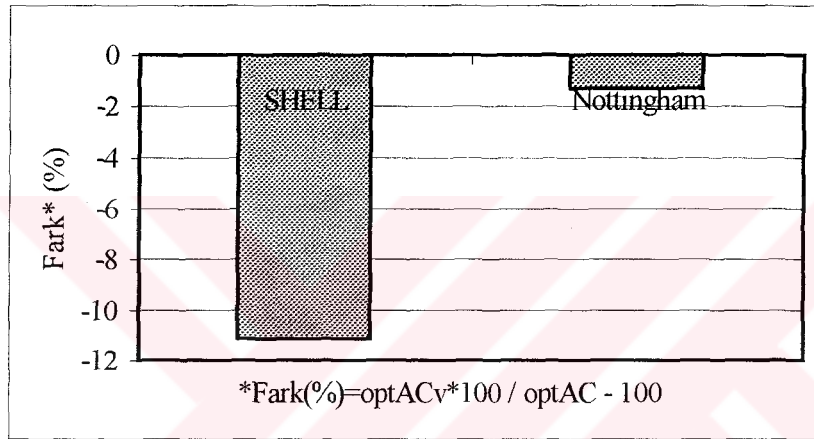


Şekil 7.5 Seçilen Üstyapı Kesiti

verilen kesit için hesaplanan başlangıç deformasyonları ve yorulma ömürleri Çizelge 7.7’de ve ayrıca yorulma ömürleri arasındaki fark Şekil 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.7 Yorulma Ömrü Tahmini

		Katkısız	katkılı
E_1 (psi)		685214,9	580435,9
ϵ_t (μ)		111	115
Yorulma Ömrü	Nottingham	98908	97594
	SHELL	25403	22574
n Katsayısı	Nottingham	0,510472	281159,5
	SHELL	0,233660	297261,9
K Katsayısı	Nottingham	0,530570	279861,4
	SHELL	0,234530	296973,5



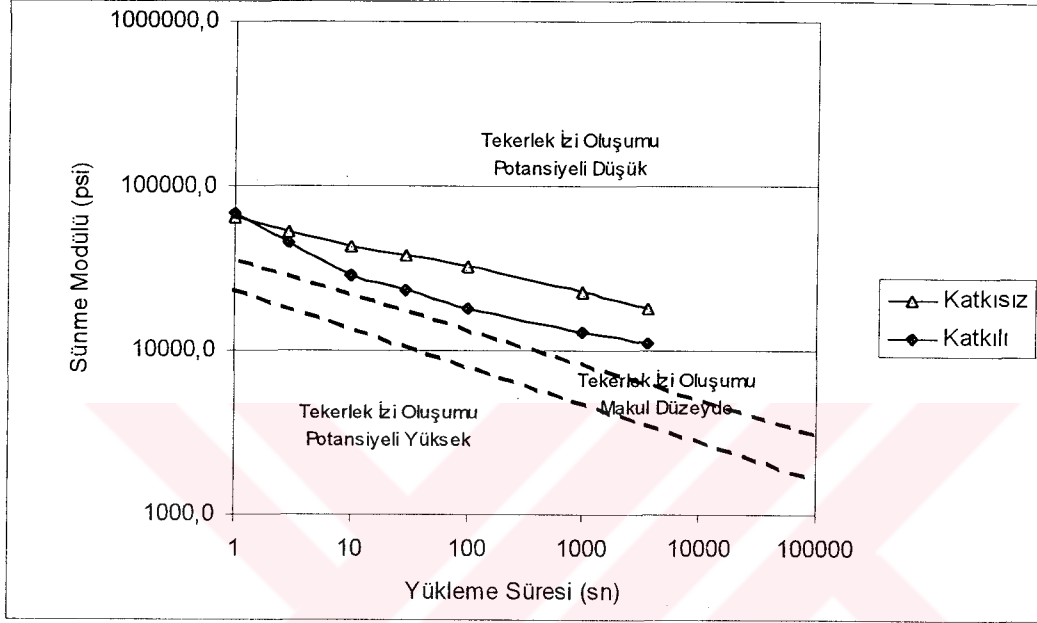
Şekil 7.6 Yorulma Ömürleri Arası Farklılık

Şekilden de görüleceği üzere yorulma açısından katkısız karışım daha iyi bir performans sergilemektedir.

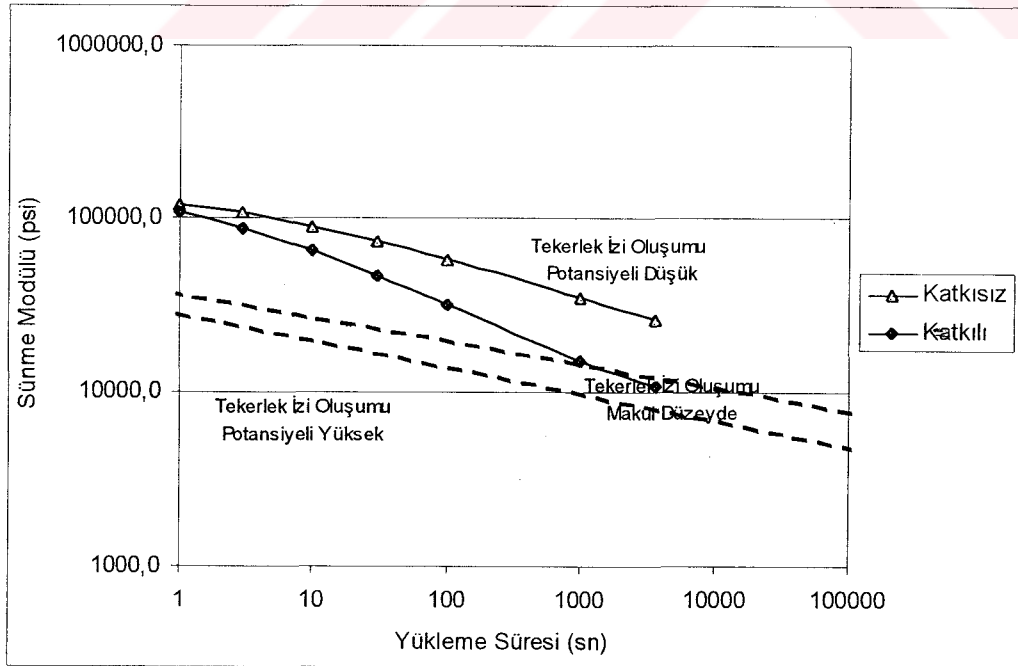
7.3.3 Karışımın Tekerlek İzi Derinliğine Ait Değerlendirme

Hazırlanan karışımların tekerlek izi oluşumu riski bakımından değerlendirilmesinde AAMAS'de tanımlanan nomoğraftan yararlanılmıştır. Bu amaçla nomoğraf üzerine katkı ve katkısız karışıma ait değerler işaretlenerek karışımlara ait bir değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeler ile ilgili olarak 5 °C için Şekil 7.7, 15 °C için Şekil 7.8, 25 °C için Şekil 7.9 ve 40 °C için ise Şekil 7.10 çizilmiştir.

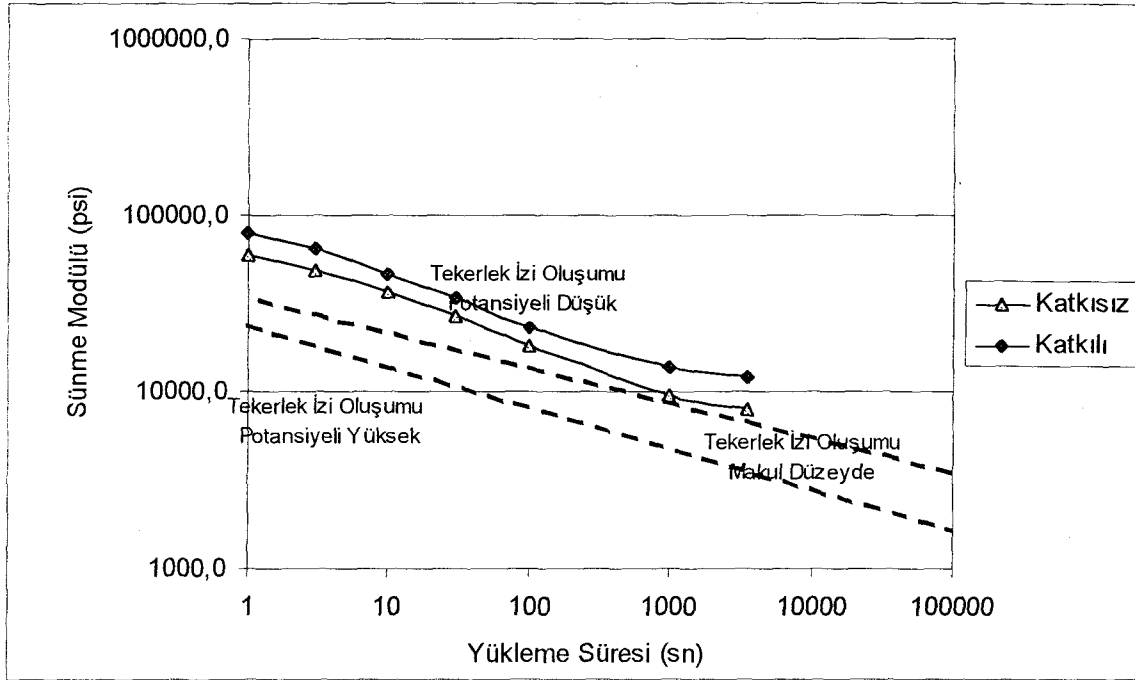
Şekillerin incelenmesinden de görüleceği tekerlek izi oluşumu potansiyeli bakımından katkı maddesi 5 ve 15 °C 'de katkısız karışıma ait eğrinin altında kalmakta ancak 25 ve 40 °C sıcaklıklarda ise üzerinde kalmaktadır. Buna göre katkılı karışımın sıcak bölgelerde kullanılmasının uygun olacağı sonucunu ortaya koymaktadır.



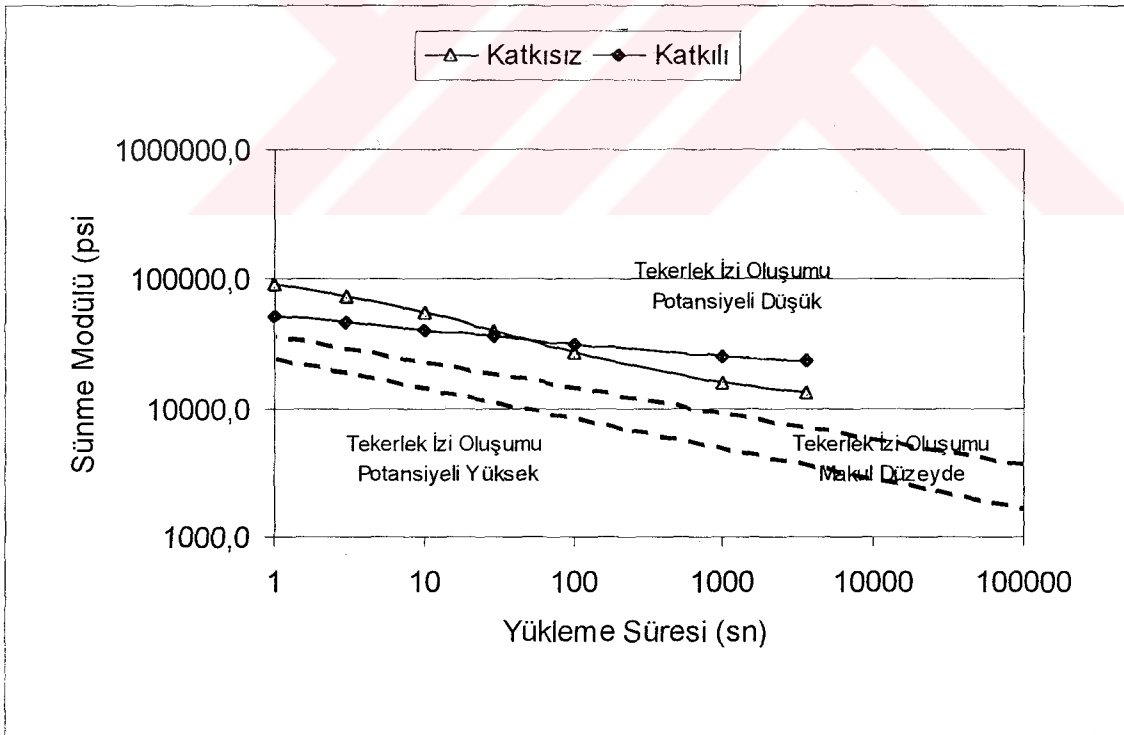
Şekil 7.7 Katkılı ve Katkısız Karışımlarında Tekerlek İzi Oluşumu Riski (5 °C)



Şekil 7.8 Katkılı ve Katkısız Karışımlarında Tekerlek İzi Oluşumu Riski (15 °C)



Şekil 7.9 Katkılı ve Katkısız Karışımlarında Tekerlek İzi Oluşumu Riski (25 °C)



Şekil 7.10 Katkılı ve Katkısız Karışımlarında Tekerlek İzi Oluşumu Riski (40 °C)

Karışımların tekrarlı yüklerden dolayı oluşan tekerlek izi derinlikleri, bu çalışmada elde edilen modelden hesaplanmıştır. Modelde tekerlek izi derinliği (kalıcı deformasyon) ile yük tekerrürü arasında; $\epsilon_p = A \cdot \ln(N) - B$ şeklinde bir ilişkinin var olduğu ve A ve B katsayılarının ise, karışım özelliklerine bağlı olarak;

$$A = - 2912,44 - 971,9476 \cdot PB + 118,6612 \cdot VFA$$

$$B = - 8011,84 + 1398,469 \cdot PB + 0,111148 \cdot CM$$

A : Kalıcı Deformasyon-Yük tekerrürü ilişkisi çarpan katsayısı

B : Kalıcı Deformasyon-Yük tekerrürü ilişkisi sabiti

PB : Bitüm Yüzdesi (4,5 – 6,5)

VFA : Asfaltla Dolu Boşluk (%)

CM : 3600. Saniye sonundaki Statik Sünme Modülü (psi)

hesaplandığı önceki bölümlerde açıklanmıştır. Yapılan hesaplamalardan katkısız için denklem;

$$\epsilon_p = 682,16 \cdot \ln(N) - 1052,70$$

ve katkılı için

$$\epsilon_p = 790,27 \cdot \ln(N) - 1289,01$$

olarak bulunmuştur. Karışımların tekerlek izi direnimini tesbit etmek amacıyla karışımlarda 72.000. yük tekerrürü sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar opt AC için 6576,9 $\mu\epsilon$ ve katkılı için ise 7549,7 $\mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır.

7.4 Genel Değerlendirme

Katkılı ve katkısız karışımların stabilite, yorulma ve tekerlek izi performanslarının değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 7.8'de özetlenmiştir. Çizelge 7.8, 1. olarak kodlanan özelliklerin 2 ile kodlanan özelliklerden daha üstün olduğunu göstermektedir. Örneğin Marshall Stabilitesi açısından katkılı karışım katkısız karışıma nazaran daha üstündür.

Çizelge 7.8 Karışım Performanslarının Değerlendirilmesi

		katkısız	opt ACv
Stabilite	Marshall	2	1
	Dolaylı Çekme Muk.	2	1
Esneklik (5-15-25-40 °C)	soğuk	1	2
	sıcak	2	1
Sünme Deneyi (5-15-25-40 °C)	soğuk	1	2
	sıcak	2	1
Ömür (25 °C)	Yorulma	1	2
	Tekerlek İzi	1	2

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında, farklı bitüm muhtevalarında hazırlanan karışımlar ile katkılı (vestoplast), katkısız karışımlar üzerinde; Marshall, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Dolaylı Çekme, Statik Sünme ve Tekrarlı Sünme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden yararlanılarak tekerlek izi tahminine yönelik bir model kurulmuş, yorulma ömrü için mevcut modellere göre, bu çalışma koşullarına uyan yorulma modelinin tespitine yönelik bir değerlendirme yapılmıştır.

Yukarıda açıklanan çok sayıdaki deneylerden elde edilen bazı bilgiler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Karışım değişkenlerinin (Pb, V, VFA ve VMA) elastik deformasyon üzerindeki etkisi 5, 15 ve 25 °C'ler de önemsizken 40 °C' de önemlidir. Deneysel çalışmada kullanılan % 4,5 ve % 6,5 aralığındaki bitüm muhtevasındaki farklılık, elastisite modülü değerini en az 1,1 en fazla ise 1,88 katı olarak etkilemektedir. Bitüm muhtevasındaki artışla birlikte elastisite modülü değeri azalmaktadır. Ayrıca boşluğun artması ile de bitüm muhtevasında olan durumun tersine elastisite modülü artmaktadır. Asfalt dolu boşluk yüzdesinin artması ile elastisite modülü değeri azalmaktadır.

2. Dolaylı çekme deneyi değişkenlerinden olan yükleme periyodunun elastisite modülü üzerindeki etkisinin en az 15 °C sıcaklık ve 40 ms yükleme hızında 1,12 en fazla ise 25 °C sıcaklık ve 80 ms yükleme hızında 2,25 oranında etkilediği görülmektedir. Yükleme periyodu 5 ve 40 °C sıcaklıklarda elastisite modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip değilken 15 ve 25 °C sıcaklıklarda önemli bir etkiye sahiptir. Aynı şekilde, yükleme hızı 5, 15 ve 40 °C sıcaklıklarda büyük bir etkiye sahip olmazken 25 °C sıcaklıkta 2000 ve 1000 ms yükleme periyodunda etki katsayısı 2'nin üzerine çıkmaktadır.

Yükleme periyodunun artmasıyla karışımların elastisite modülü değerleri düşmekte, yükleme hızının artmasıyla ise artmaktadır.

3. Statik sünme deneyinde, yükün uygulamasının başlaması ile numunelerde ani bir deformasyon artışı meydana gelmekte ancak belirli bir süre sonra deformasyon oluşturma

hızı azalmaktadır. Karışım içerisindeki bitüm muhtevasının artması ile oluşan deformasyon miktarları artış göstermekte başka bir deyişle bitüm muhtevasının artması, karışımda tekerlek izi oluşma riskini artırmaktadır. Sıcaklığın artması ile karışımlarda oluşan deformasyonlar artmaktadır.

4. Tekrarlı sünme deneylerinde boşluk yüzdesinin yaklaşık 3,5 değerinden sonra deformasyonlarda bir azalma gözlenmektedir. Asfaltla Dolu Boşluk yüzdesinde ise 80 değerinden sonra deformasyonlarda ani bir artış oluşmaktadır.
5. Yüksek sıcaklıklarda bitüm muhtevastaki artış, 40 °C sıcaklık için AAMAS elastisite modülü uygunluk eğrileri dışına çıkmaktadır; ancak 5 °C sıcaklıkta karışımların elastisite modülü değerlerinin artmasına rağmen söz konusu eğriler arasında kalmaktadır.
6. Sıcak iklime sahip, ağır trafik yükünün fazla olduğu bölgelerde karayolu üstyapısının dayanımında bitüm muhtevası ve sıcaklık çok daha büyük bir öneme sahiptir. Yapılan deneysel çalışmalara göre 5, 15 ve 25 °C sıcaklıklarda karışımlar nisbeten yüksek elastisite modülü değerine sahip olduklarından dayanımı yüksek olmakta, ancak yüksek çatlama potansiyeline sahip olduklarının göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise karışımlar düşük elastisite değerine sahip olduklarından dolayı ağır trafik yükü altında tekerlek izi oluşumu potansiyelleri yüksek olmaktadır. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda Dolaylı Çekme Deneyi, düşük sıcaklıklarda ise Sünme Deneyi bitümlü karışımın performansını daha iyi ortaya koymaktadır.
7. Yapılan deney çalışmalarında değerlendirilen Vestoplast katkı malzemesi sıcak bölgelerde, katkısız karışım ise düşük sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedirler.

Yukarıda maddeler halinde sıralanan bilgilerin dışında, yapılan çok sayıda deney sayesinde ilişkisi çok yüksek olan bir tekerlek izi tahmin modeli kurulmuştur. Bu model sayesinde, bugün için geçerli olan değerlendirme kriterlerine göre farklı tipteki karışımların (katkı maddeleri, agrega gradasyonu, v.b.) değerlendirilmesine ve ileride yanıltıcı sonuçların önüne geçmek için bir hizmet ömrü tahminine yönelik bir model sunulmaktadır.

İleride bu konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda, farklı tipte bağlayıcı ve agregalar kullanılarak kurulacak olan modeller sayesinde farklı tipteki agregalar ve bağlayıcılar da değerlendirilecektir. Böylece aynı tip bağlayıcı ve agregalar ile sınırlı kaldığı düşünülen modelin, ileride yapılacak benzer çalışmalar sayesinde geçerliliğinin devam edip etmeyeceği tereddütü ortadan kaldırılmış olacaktır. Halen ülkemizde sıcak asfalt üretiminde kullanılan malzemeler bu tezde kullanılan model kapsamında kalmakla birlikte, ileride meydana gelecek değişikliklere göre geliştirilecek yeni modeller sayesinde güvenli bir proje ömrü tahmin edilebilecek ve farklı tipteki sıcak asfalt karışımların birbirleriyle ekonomik açıdan karşılaştırılmasına olanak sağlayan analizler yapılabilecektir. Özellikle yeni üstyapı kaplama teknolojilerini de (SMA, Chip Seal, v.b.) göz önüne alarak deneysel çalışmaların yapılması bu tip kaplamaların performanslarının değerlendirilmesi bakımından da büyük bir öneme sahip olacaktır. Ayrıca dört farklı iklimin aynı anda yaşandığı ülkemizde, tekerlek izi tahmin modeline, sıcaklığın da bir değişken olarak ilave edilmesi, modelin kullanılabilirliğini daha da arttıracaktır.

KAYNAKLAR:

AASHTO, (1993), Guide for Design of Pavements Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C.

Adedimila A. S. Ve Kennedy T. W., (1980), Repeated-Load Indirect Tensile Fatigue Characteristics of Asphalt Mixtures, Center for Highway Research, University of Texas, Texas

Alderson A., (1995) UMATTA Testing Equipment Trial Course, England

Aktharhusein A. Tayebali, A. Deacon and Monosmith C. L., (1995), Comparison of Axial and Diametral Resilient Stiffness of Asphalt-Aggregate Mixes, Transportation Research Record TRR 1492, TRB, Washington D. C., s 135-143

ASTM Standart Book

Baladi G. Y. Ve Harichandran R. S., (1989), Asphalt Mix Design and the Indirect Test: A New Horizon, ASTM STP 104, Philadelphia, s 86-105

Bannot J., (1986), Asphalt Agregate Mixture, Transportation Research Record 1096, Transportation Research Board, Washington D. C.

Barksdale R. D. ve Miller J. H., (1977), Development of Equipment and Techniques for Evaluating Fatigue and Rutting Characteristics of Asphalt Concrete Mixes, Report, Atlanta

Biczysko, S. J., (1990), Asphalt Performance at Low Temperatures, Highways and Transportation, March 1990, s 20-25

Birliker R. Y., (1998), Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, YTÜ, Doktora Tezi, İstanbul

Fenella L., Harvey J., Schiffy C. ve Monismith C. L., (1996), Prediction of Pavement fatigue for California department of Transportation Accelerated Pavement Testing Program Drained and Undrained Test Sections, Transportation Research Record TRR 1540, TRB, Washington D. C., s 105-114

Harvey, J., Monismith C. L., Effects of Laboratory Asphalt Concrete Specimen Preparation Variables on Fatigue and Permanent Deformation Test Results Using Strategic Highway Research Program A-003 A proposed Testing Equipment, Transportation Research Record TRR 1417, TRB, Washington D. C., 1993, s 38-48

Harvey J. T. Ve Tsai B., (1996), Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness, Transportation Research Record TRR 1543, TRB, Washington D. C., s 38-45

İlcalı, M., (1988), Erdemir Cürufunun Yol Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul

İnan, M., (1981), Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ, İstanbul

Khostla N. P. Ve Omer M.S., (1985), Characterization of Asphaltic Mixtures for Prediction of Pavement Performance, Transportation Research Record 1034, Transportation Research Board, Washington D. C.

Kunst P. A. J. C., (1989), Surface Cracking on Asphalt Layers, Holland

Kennedy T. W. Ve Anagnos J. N., (1983), Procedures for the Static and Repeated Load Indirect Tensile Tests, Researc Record 183-14, University of Texas, Texas

Kim V. R., Kim N. ve Khosla P., (1992), Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete, Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, Philadelphia

Monismith, C. L., Deacon, J. A., Craus, J. Ve Tangella, S. C. S., (1990), Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures, Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRP-A/IR-90-011, California

Marl A. K., (1996), Vestoplast-ein thermoplastischer Kunststoff zur Polymermodifizierung, Asphalt, 9/96

Mathews J. M. ve Monismith C. L., (1993), Investigation of Laboratory fatigue testing procedures for asphalt aggregate mixtures, Journal of Transportation Engineering, Vol 119, July/August, s 634-654

Müller B. Ve Marl A. K: (1997), Vestoplast die Alternative zu fertig gemishten Polymerbitumen, VouBruez

NCHRP Synthesis235

Omar A. H. ve Haas R., (1994), Effect of Field Compaction Method on Fatigue Life of Asphalt Pavements, Transportation Research Record TRR 1469, TRB, Washington D. C., s 43-49

Pell P. S., ve Cooper K. E., (1975), The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 44

Pell P. S. ve Hanson J. M., (1973), Behavior of Bituminous Road Base Materials under Repeated Loading, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 38

Postacioğlu, B., (1981), Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İTÜ, İstanbul

Raithby, K. D. ve Ramshaw, J. T., (1972), Effects of Secondary Compaction the Fatigue Performance to Prevent Fatigue Cracking, Special Report 140, Highway Research Board, s 49-64

Raithby, K. D. ve Sterling A. B. (1972), Some Effects of Loading History on the Performance of Rolled, TRRL-LR 496, Crowthorne, England

Safwat S., (1996), Fatigue and Stiffness Properties of Roadbase Layer Using Indirect Tensile Test, Euroasphalt and Eurobitumen Congress, 4.08.1-11, 7-10 May, Strasbourg, France

Scung W. L., (1993) Waste products as highway materials in flexible pavement system, Journal of Transportation Engineering, Vol 119, May/June, s 433-449

TCK, (1994), Yollar Fenni Şartnamesi, Ankara

Thompson M. R. ve Barenberg E., (1990) Calibrated Mechanistic Structurel Analysis Procedures for Pavements, National Highway Research Program, NCHRP 1-26

Umar F. ve Ağar, E., (1985), Yol Üstyapısı, İTÜ, İstanbul

Von Quintus, H. Scherocman J., Hughes C. Ve Kennedy T., (1991), NCHRP Report 338: Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS), TRB, National Research Council, Washington D. C.

Van Dijck W., (1975), Practical Fatigue Characterization of Bituminious Mixes, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technilogist 38

Von Quintus, H. L., Scherocman, Huhges, C. S. Ve Kennedy T. W. (1988), Development of Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System, Brenth Rauhut Engineering, Inc., Austin

Yağız, F., Işıkarlan, C.Keçeciler, A.F., ve Akkol, G., (1967), Bitümlü Malzemeler, T.C.Bayındırlık Bakanlığı KGM-Y.N.149.

Yüce, R., (1972), The Influence of Some Dimensional Factors and Elastic Foundation Support on Fatigue of Asphalt Concrete, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara



**EK A. Marshall Dizayn Deneyi
Sonuçları**

BİTÜM				Biriket Yüksekliği				Havadaki		Sıdaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk		VMA	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzelme	Düzelt.	FORMÜLLER																			
%	Wa	Wb	(gr)	1	2	3	Ort	Ağrl. (gr)	Ağrl. (gr)	C	B	V	Ağrlık	Öz. Ağrlık	%	Vh	%	Vf	(mm)	(kg)	Faktör	(kg)																				
	4,00	3,85		57,4	58,0	57,5	57,6	1140	663,2				476,8	2,391					2,70	840	1,175	987,00	$V = B - C$																			
				57,0	56,8	56,9	56,9	1136,7	661,2				475,5	2,391					2,75	810	1,198	970,38	$D_p = \frac{A}{V}$																			
				58,2	58,1	58,5	58,3	1142,3	664,2				478,1	2,389					2,74	835	1,152	961,92	$D_T = \frac{(100 + W_a)}{100 + \frac{W_a}{G_{ef}} + \frac{G_b}{G_{ef}}}$																			
ORTALAMALAR																							57,50	14,37	6,11	2,546	5,33	14,69	63,70	2,79	2,85	850	1,140	969,00	$D_T = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100$							
	4,50	4,31		58,6	59,1	58,5	58,7	1147	671,4				475,6	2,412					2,73	920	1,143	1051,56																				
				58,5	58,6	58,7	58,6	1149,3	665,2				484,1	2,374					2,80	890	1,143	1017,27																				
				58,5	58,8	58,6	58,6	1148,0	668,2				479,8	2,393					2,79			1034,42																				
ORTALAMALAR																							63,70	14,32	3,80	2,510	5,33	14,67	81,69	3,40	3,60	1040	1,090	1133,60								
	5,00	4,76		59,5	58,7	59,1	59,1	1150,3	673,1				477,2	2,411					3,40	970	1,085	1052,45	$G_{sb} = \frac{K\%}{G_k} + \frac{I\%}{G_i} + \frac{F\%}{G_f}$																			
				60,1	59,1	59,9	59,7	1152,9	676,5				476,4	2,420					3,20	1030	1,079	1111,37																				
				59,8	58,9	59,1	59,3	1145,5	670,8				474,7	2,413					3,40			1122,49																				
ORTALAMALAR																							73,48	14,32	3,80	2,510	5,33	14,67	81,69	3,40	3,60	1040	1,090	1133,60								
	5,50	5,21		59,8	60,6	60,1	60,2	1159,9	682,2				477,7	2,428					3,65	1010	1,094	1104,94	$VMA = 100 - \frac{D_p * (100 - W_b)}{G_{sb}}$																			
				60,2	60,5	60,6	60,4	1158,4	681,2				477,2	2,427					4,30	680	1,085	737,80																				
				60,5	60,3	60,9	60,6	1157,1	680,3				476,8	2,427					4,40	700	1,085	759,50																				
ORTALAMALAR																							81,69	14,27	2,61	2,493	5,33	14,67	81,69	3,40	3,65	1010	1,094	1104,94								
	6,00	5,66		59,6	60,6	60,0	60,1	1156,8	680,5				476,3	2,429					3,90	1020	1,090	1111,80	$G_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$																			
				59,7	60,7	60,1	60,2	1159,8	681,9				477,9	2,427					3,40	920	1,110	1021,20																				
				59,9	59,3	59,7	59,6	1157,8	680,8				477,0	2,427					3,65			1108,37																				
ORTALAMALAR																							86,76	14,67	1,94	2,476	1,83	15,54	88,25	4,35	3,65	680	1,085	737,80								
	6,50	6,10		60,0	60,8	60,3	60,4	1162,1	680,3				481,8	2,412					4,30	680	1,085	737,80																				
				59,9	60,5	60,8	60,4	1160,1	679,9				480,2	2,416					4,40	700	1,085	759,50																				
				60,0	60,6	60,2	60,3	1160,2	679,8				480,4	2,415					4,35	685	1,088	745,28																				
ORTALAMALAR																							88,25	15,54	1,83	2,459	1,83	15,54	88,25	4,35	4,35			747,53								
																							$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{ef} - G_{sb})}{(G_{ef} * G_{sb})} * G_{sb}$																			
ORTALAMALAR																																										

$$\text{Bitüm Özgül Ağırlığı (Gb)} = 1,019$$

Kaba Agregasi (%) = 44,0

Kaba Agr. Hac. öz. ağ. (Gk) = 2,695

Bitüm Penetasyonu = 75,0

Ince Agregasi (%) = 50,0

İnce Agr. hac. öz. ağ. (Gi) = 2,666

Agreganın Bitüm Abs. =

Filler %si (F%) = 6.0

Filler zahiri öz. ağ. (Gf) = 2,747

$$\text{Agf. Kar. efektif öz. ađ. (Gef)} = 2,708$$

Agrega Kar. hac. öz. ağ. (Gsb) = 2,684

Birlikteki Agrega Miktarı = 1100

BİTÜM				Braket Yüklüklüğü					Sıradaki		Döy. Yüz.		Hacim		Hac. Özg.		Max. Tec.		Boşluk		VMA		Asf.Dolu		Akma		Stabilite		Düzeltme		Düzeltli.		FORMÜLLER
%										Ağırl. (gr)		K. ağırl.(gr)		V		Ağırlık		Öz. Ağırlık		%		%		Boşluk %		(mm)		(kg)		(kg)			
W _a	W _b	1	2	3	Ort.	A	B	C	B	A	C	B	A	V	DP	DT	DT	%	V _h	%	80,49	4,73	2,80	890	1,187	1056,43							
4,00	3,85	56,9	57,3	57,5	57,2	1145,6	670,3	475,3	2,410					475,3	2,410							13,44	62,14	2,78	2,95	1010	1,155	1166,55					
		56,5	56,8	56,7	56,7	1140,3	668,3	472,0	2,416					472,0	2,416									2,96	1000	1,149	1149,00						
		57,6	57,5	57,2	57,4	1150,1	675,3	474,8	2,422					474,8	2,422	2,546	5,09							2,97	980	1,143	1120,14						
ORTALAMALAR																																	
4,50	4,31	58,2	58,4	58,0	58,2	1150,0	674,6	475,4	2,419					475,4	2,419									2,96	1120	1,100	1232,00						
		58,4	58,6	58,2	58,4	1153,2	676,2	477,0	2,418					477,0	2,418									3,20	1140	1,117	1273,38						
		58,5	58,7	58,6	58,6	1152,3	675,8	476,5	2,418					476,5	2,418	2,528	4,32							3,00	1100	1,117	1228,70						
ORTALAMALAR																																	
5,00	4,76	60,0	59,9	59,8	59,9	1161,2	681,3	479,9	2,420					479,9	2,420	2,510	3,61							3,40	930	1,097	1020,21						
		59,6	58,9	59,6	59,4	1149,2	674,0	475,2	2,418					475,2	2,418									3,30	920	1,107	1018,44						
		59,8	58,8	59,7	59,4	1154,2	677,3	476,9	2,420					476,9	2,420	2,493	2,82							3,50	920	1,104	1015,68						
ORTALAMALAR																																	
5,50	5,21	59,5	60,4	60,2	60,0	1155,6	678,1	477,5	2,420					477,5	2,420	2,493	2,82							3,40	890	1,100	979,00						
		59,8	59,2	60,1	59,7	1161,2	681,6	479,6	2,421					479,6	2,421									4,80	890	1,100	979,00						
		59,6	60,2	59,7	59,8	1157,3	680,2	477,1	2,426					477,1	2,426									4,70	880	1,104	971,52						
ORTALAMALAR																																	
6,00	5,66	59,4	60,4	59,8	59,9	1156,6	677,8	478,8	2,416					478,8	2,416	2,476	2,47							4,70	890	1,094	973,66						
		60,1	59,5	59,7	59,8	1156,3	677,7	478,6	2,416					478,6	2,416									4,70	890	1,094	973,66						
		59,9	60,1	60,2	60,1	1160,2	679,2	481,0	2,412					481,0	2,412	2,476	2,47							4,73	790	1,090	861,10						
ORTALAMALAR																																	
6,50	6,10	59,7	60,7	60,1	60,2	1158,4	676,3	482,1	2,403					482,1	2,403									5,50	790	1,090	861,10						
		59,9	60,8	60,1	60,3	1161	677,7	483,3	2,402					483,3	2,402									5,30	740	1,088	805,12						
		59,6	60,5	60,3	60,1	1159,4	676,9	482,5	2,403					482,5	2,403	2,459	2,30							5,40	780	1,094	833,32						
ORTALAMALAR																																	
									2,403						2,403	2,459	2,30							5,40	780	1,094	833,32						
ORTALAMALAR																																	
																																$V = B - C$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	
																																$D_p = \frac{A}{V}$	

$$\text{Bütüm Özgül Ağırılığı (Gb)} = 1,019$$

Kaba Agregasi (%) = 44.0

Kaba Agr. Hac. öz. ağ. (Gk) = 2.695

Bitüm Penetasyonu = 75,0

İnce Ağrega %'si (İ%) = 50.0

İnce Agr. hac. öz. ağı. (Gi) = 2,666

Agreganın Bitüm Abs. =

Filler %'si (F%) = 6.0

Filler zahiri öz. ağ. (Gf) = 2.747

Agr. Kar. efektif öz. a. g. (Gef) = 2.708

Agrega Kar. hac. öz. ağ. (Gsh) = 2.684

Biriketteki Agrega Miktarı = 1100

EK B. Dolaylı Çekme Deneyi
Sonuçları

Çizelge B 1. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve % 4.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU						Elastik	Faz	Elastisite Modülü		
						Deformasyon	Gecikmesi			
						$\mu\epsilon$	Ms	Mpa	PSI	kg/cm ²
L	0	1	3	4		10,10	2,90	15962,79	2315205,8	162775,08
L	0	1	3	6		10,60	3,10	15209,82	2205997,9	155097,01
L	0	1	3	8		11,05	3,40	14590,42	2116160,9	148780,84
L	0	1	2	4		9,50	3,40	16970,96	2461429,3	173055,61
L	0	1	2	6		9,30	3,70	17335,93	2514363,2	176777,24
L	0	1	2	8		9,90	3,50	16285,27	2361977,6	166063,46
L	0	1	1	4		9,10	3,60	17716,94	2569624,0	180662,45
L	0	1	1	6		8,90	4,00	18115,07	2627368,3	184722,28
L	0	1	1	8		10,60	3,80	15209,82	2205997,9	155097,01

Çizelge B 2. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon με	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	1	1	3	4	10,60	4,10	15440	2239323,4	157440,0
L	1	1	3	6	11,07	3,00	14585	2115443,5	148730,4
L	1	1	3	8	11,54	3,30	14676	2128501,5	149648,5
L	1	1	2	4	10,21	3,90	16234	2354480,5	165536,4
L	1	1	2	6	10,57	4,20	15260	2213312,6	155611,3
L	1	1	2	8	11,07	4,40	14947	2167859,3	152415,6
L	1	1	1	4	10,21	3,70	16205	2350303,0	165242,7
L	1	1	1	6	10,65	3,80	15086	2187984,9	153830,6
L	1	1	1	8	10,71	4,70	15639	2268198,1	159470,1

Çizelge B 3. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve % 5.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi Ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 2 1 3 4	11,57	3,10	14136	2050311,3	144151,2
L 2 1 3 6	9,91	5,30	15666	2272218,0	159752,7
L 2 1 3 8	10,93	5,40	14775	2142952,0	150664,4
" 2 1 2 4	9,49	5,00	16784	2434247,1	171144,5
L 2 1 2 6	9,58	4,00	16156	2343209,2	164743,9
L 2 1 2 8	10,07	3,70	15685	2274924,1	159943,0
L 2 1 1 4	8,86	4,70	17886	2594095,6	182383,0
L 2 1 1 6	9,49	5,00	16581	2404873,3	169079,3
L 2 1 1 8	10,18	3,70	15663	2271692,5	159715,8

Çizelge B 4. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve % 6.0 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 3 1 3 4	12,72	5,40	12700	1842040,6	129508,3
L 3 1 3 6	12,01	5,10	12821	1859512,6	130736,7
L 3 1 3 8	12,37	4,70	12838	1862034,8	130914,0
L 3 1 2 4	10,38	7,40	15283	2216675,6	155847,7
L 3 1 2 6	10,79	5,30	14327	2077951,1	146094,4
L 3 1 2 8	11,90	4,80	13597	1972042,3	138648,3
L 3 1 1 4	10,10	5,60	15749	2284172,4	160593,2
L 3 1 1 6	10,52	5,10	14894	2160240,0	151879,9
L 3 1 1 8	11,34	4,70	14265	2068939,3	145460,8

Çizelge B 5. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve % 6.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 4 1 3 4	11,29	4,60	13633	1977270,8	139015,9
L 4 1 3 6	10,90	4,80	14049	2037647,4	143260,8
L 4 1 3 8	11,84	5,40	13363	1938201,9	136269,1
L 4 1 2 4	10,46	4,60	14827	2150518,7	151196,4
L 4 1 2 6	10,49	5,10	14566	2112632,2	148532,8
L 4 1 2 8	11,45	4,30	13654	1980371,0	139233,9
L 4 1 1 4	10,13	4,60	15406	2234384,0	157092,7
L 4 1 1 6	10,87	3,80	14224	2063001,5	145043,4
L 4 1 1 8	11,26	4,60	14202	2059848,6	144821,7

Çizelge B 6. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi Ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 5 1 3 4	11,29	4,30	14124	2048498,4	144023,7
L 5 1 3 6	10,43	5,40	14826	2150334,8	151183,5
L 5 1 3 8	11,01	5,70	14622	2120803,3	149107,2
L 5 1 2 4	9,58	6,80	16540	2398856,6	168656,3
L 5 1 2 6	9,88	5,40	15542	2254168,0	158483,7
L 5 1 2 8	10,65	4,70	15083	2187590,8	153802,9
L 5 1 1 4	9,55	6,50	16607	2408682,9	169347,2
L 5 1 1 6	9,74	5,50	15840	2297414,3	161524,2
L 5 1 1 8	10,74	5,30	14866	2156167,6	151593,6

Çizelge B 7. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(5 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 6 1 3 4	12,31	6,10	13167	1909773,9	134270,4
L 6 1 3 6	12,03	4,70	12985	1883342,7	132412,1
L 6 1 3 8	12,61	3,20	12644	1833922,1	128937,5
L 6 1 2 4	11,29	5,10	14096	2044478,6	143741,1
L 6 1 2 6	10,07	5,70	13735	1992089,1	140057,7
L 6 1 2 8	12,26	7,70	12914	1872990,9	131684,3
L 6 1 1 4	10,93	4,10	14562	2112054,2	148492,1
L 6 1 1 6	11,07	5,50	14170	2055119,4	144489,2
L 6 1 1 8	11,90	4,20	13368	1938832,5	136313,4

Çizelge B 8. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve % 4,5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 0 2 3 4	15,90	8,00	10140	1470665,3	103398,0
L 0 2 3 6	16,80	6,00	9596,7	1391879,7	97858,8
L 0 2 3 8	19,40	5,10	8310,5	1205339,1	84743,7
L 0 2 2 4	16,40	7,80	9830,7	1425827,9	100245,6
L 0 2 2 6	17,20	6,50	9373,5	1359510,4	95583,0
L 0 2 2 8	19,30	5,30	8353,6	1211584,4	85182,8
L 0 2 1 4	15,90	7,30	10140	1470665,3	103398,0
L 0 2 1 6	17,90	4,80	9006,9	1306345,1	91845,2
L 0 2 1 8	18,90	6,20	8530,4	1237226,4	86985,6

Çizelge B 9. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 1 2 3 4	16,20	8,70	9604,6	1393025,2	97939,4
L 1 2 3 6	17,69	6,10	8831,1	1280837,0	90051,8
L 1 2 3 8	19,51	5,20	8062,4	1169358,2	82214,0
L 1 2 2 4	16,56	7,90	9478,9	1374791,3	96657,4
L 1 2 2 6	18,30	6,80	8550,5	1240139,2	87190,4
L 1 2 2 8	20,34	5,40	7826,6	1135150,0	79808,9
L 1 2 1 4	16,64	7,10	9421,1	1366410,0	96068,1
L 1 2 1 6	18,30	5,00	8547,2	1239666,3	87157,2
L 1 2 1 8	20,40	6,20	7833,7	1136174,7	79881,0

Çizelge B 10. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve % 5.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 2 2 3 4	17,66	7,50	8899,7	1290794,7	90751,8
L 2 2 3 6	18,91	6,60	8356,6	1212026,5	85213,9
L 2 2 3 8	20,23	5,90	7841,8	1137357,0	79964,1
L 2 2 2 4	16,75	7,60	9503,3	1378338,2	96906,8
L 2 2 2 6	17,66	6,90	8934,5	1295839,2	91106,5
L 2 2 2 8	19,65	6,60	8125,3	1178475,1	82855,0
L 2 2 1 4	16,48	9,10	9682,1	1404270,3	98730,0
L 2 2 1 6	17,72	6,10	8910,8	1292397,4	90864,5
L 2 2 1 8	19,18	7,50	8305,2	1204564,8	84689,3

Çizelge B 11. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve % 6.0 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	3	2	3	4	21,39	7,40	7347,8	1065708,9	74926,8
L	3	2	3	6	21,89	6,60	7134,4	1034758,6	72750,7
L	3	2	3	8	24,29	6,70	6488,1	941014,5	66159,9
L	3	2	2	4	20,01	8,10	7784,7	1129080,8	79382,2
L	3	2	2	6	22,11	7,10	7013,8	1017260,4	71520,5
L	3	2	2	8	24,73	6,50	6335,7	918918,4	64606,4
L	3	2	1	4	20,09	7,00	7759	1125350,0	79119,9
L	3	2	1	6	22,33	7,10	6975,4	1011690,4	71128,9
L	3	2	1	8	24,57	5,90	6439,5	933973,2	65664,8

Çizelge B 12. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve % 6.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	4	2	3	4	21,94	8,50	7114,5	1031868,6	72547,5
L	4	2	3	6	21,89	9,30	7094,9	1029031,0	72348,0
L	4	2	3	8	22,66	7,40	7015,8	1017549,5	71540,8
L	4	2	2	4	17,28	10,30	9134,3	1324819,0	93144,0
L	4	2	2	6	18,63	8,70	8417	1220775,6	85829,0
L	4	2	2	8	20,59	9,80	7785,1	1129133,3	79385,9
L	4	2	1	4	16,23	8,60	9866,3	1430990,5	100608,6
L	4	2	1	6	17,17	7,90	9229,6	1338638,9	94115,6
L	4	2	1	8	19,16	8,80	8611,1	1248940,9	87809,2

Çizelge B 13. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	5	2	3	4	21,28	8,00	7906,7	1146762,9	80625,4
L	5	2	3	6	18,88	7,30	8458,8	1226844,8	86255,7
L	5	2	3	8	20,18	5,80	7980,6	1157482,5	81379,1
L	5	2	2	4	16,34	6,70	9610	1393813,4	97994,8
L	5	2	2	6	17,97	7,70	8717,1	1264310,9	88889,9
L	5	2	2	8	20,01	6,90	9864,2	1430675,2	100586,4
L	5	2	1	4	16,31	6,70	9655,7	1400434,3	98460,3
L	5	2	1	6	18,24	5,40	8674	1258057,8	88450,2
L	5	2	1	8	19,82	7,00	8059	1168859,0	82178,9

Çizelge B 14. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(15 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	6	2	3	4	20,40	6,10	7912,1	1147551,1	80680,8
L	6	2	3	6	20,09	5,40	7871,9	1141718,4	80270,7
L	6	2	3	8	20,07	4,90	7926,4	1149626,7	80826,8
L	6	2	2	4	16,53	5,30	9364,7	1358239,0	95493,7
L	6	2	2	6	17,83	4,00	8723,5	1265230,5	88954,5
L	6	2	2	8	19,54	5,10	8190,5	1187933,6	83520,0
L	6	2	1	4	15,73	6,40	9965,2	1445335,9	101617,2
L	6	2	1	6	17,09	5,90	9228,7	1338507,5	94106,4
L	6	2	1	8	18,47	4,50	8731,8	1266439,1	89039,5

Çizelge B 15. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve % 4.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi Ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 0 3 3 4	24,80	6,90	6501	942886,2	66291,5
L 0 3 3 6	30,25	6,50	5329,7	773010,8	54348,0
L 0 3 3 8	36,92	6,20	4366,9	633358,0	44529,5
L 0 3 2 4	28,95	7,20	5569,1	807722,9	56788,5
L 0 3 2 6	33,11	6,00	4869,3	706239,1	49653,5
L 0 3 2 8	36,97	7,00	4360,9	632501,4	44469,3
L 0 3 1 4	28,93	6,40	5572,9	808281,3	56827,8
L 0 3 1 6	31,91	6,60	5052,5	732797,8	51520,8
L 0 3 1 8	37,98	5,40	4245	615681,4	43286,7

Çizelge B 16. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 1 3 3 4	30,69	6,80	5225,6	757913,9	53286,6
L 1 3 3 6	34,28	7,00	4580,7	664380,0	46710,5
L 1 3 3 8	38,95	5,80	4067,5	589947,0	41477,4
L 1 3 2 4	31,41	6,60	5039,8	730957,3	51391,4
L 1 3 2 6	34,81	6,20	4463,9	647433,5	45519,1
L 1 3 2 8	37,23	7,40	4217,9	611754,0	43010,6
L 1 3 1 4	31,60	6,50	5018,2	727830,7	51171,6
L 1 3 1 6	34,83	6,80	4472,6	648694,7	45607,8
L 1 3 1 8	38,81	5,60	4052,1	587713,7	41320,4

Çizelge B 17. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve % 5.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	2	3	3	4	36,16	7,90	4398,5	637948,8	44852,2
L	2	3	3	6	39,25	6,80	3958,5	574130,3	40365,4
L	2	3	3	8	45,51	7,20	3492,4	506528,3	35612,5
L	2	3	2	4	36,30	8,00	4287,5	621843,1	43719,9
L	2	3	2	6	40,49	7,70	3806,3	552060,4	38813,7
L	2	3	2	8	45,49	7,20	3445,7	499749,8	35135,9
L	2	3	1	4	35,88	7,70	4317,7	626230,8	44028,4
L	2	3	1	6	40,10	7,90	3852,3	558733,9	39282,9
L	2	3	1	8	44,77	6,40	3479,7	504689,2	35483,2

Çizelge B 18. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve % 6.0 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	3	3	3	4	43,44	10,20	3653,1	529833,0	37250,9
L	3	3	3	6	48,85	8,80	3177,9	460917,4	32405,7
L	3	3	3	8	56,00	8,10	2789,3	404560,6	28443,4
L	3	3	2	4	43,75	9,30	3516,1	509970,2	35854,5
L	3	3	2	6	51,31	8,40	3043,3	441396,1	31033,2
L	3	3	2	8	57,66	8,50	2740,6	397493,0	27946,5
L	3	3	1	4	44,82	10,00	3464,3	502455,9	35326,1
L	3	3	1	6	50,26	8,80	3066,1	444706,6	31266,0
L	3	3	1	8	56,33	7,00	2770,5	401828,1	28251,3

Çizelge B 19. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve % 6.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 4 3 3 4	38,48	10,40	4126,6	598512,1	42079,6
L 4 3 3 6	40,82	9,10	3840	556947,3	39157,3
L 4 3 3 8	47,03	8,60	3345,3	485194,2	34112,5
L 4 3 2 4	37,18	9,30	4088,7	593021,0	41693,5
L 4 3 2 6	42,51	7,60	3572,3	518115,0	36427,1
L 4 3 2 8	49,10	8,50	3157,6	457974,8	32198,8
L 4 3 1 4	36,24	9,60	4218,3	611806,6	43014,3
L 4 3 1 6	42,48	7,40	3642,2	528256,6	37140,1
L 4 3 1 8	47,56	7,90	3289,3	477075,7	33541,7

Çizelge B 20. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 5 3 3 4	26,86	10,50	5911,6	857412,0	60282,0
L 5 3 3 6	31,82	9,70	4992,9	724152,4	50913,0
L 5 3 3 8	37,73	9,20	4278,2	620503,1	43625,7
L 5 3 2 4	29,75	10,10	5362	777697,9	54677,6
L 5 3 2 6	33,31	9,30	4724,4	685214,9	48175,4
L 5 3 2 8	38,20	7,40	4177,9	605947,6	42602,3
L 5 3 1 4	29,75	9,00	5293,4	767740,3	53977,5
L 5 3 1 6	33,29	9,10	4697,4	681300,2	47900,1
L 5 3 1 8	38,20	7,90	4180,4	606315,4	42628,2

Çizelge B 21. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(25 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 6 3 3 4	32,96	8,10	4826,7	700059,5	49219,1
L 6 3 3 6	38,64	6,40	4109,4	596016,1	41904,1
L 6 3 3 8	45,07	7,50	3642,2	528256,6	37140,1
L 6 3 2 4	35,77	8,30	4448,7	645226,6	45363,9
L 6 3 2 6	39,91	6,90	4002	580435,9	40808,7
L 6 3 2 8	45,65	6,00	3592,4	521031,4	36632,1
L 6 3 1 4	36,13	6,60	4444,9	644674,8	45325,1
L 6 3 1 6	40,63	7,70	3967,4	575417,7	40455,9
L 6 3 1 8	45,05	5,80	3644	528519,3	37158,6

Çizelge B 22. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve % 4.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 0 4 3 4	158,23	14,50	1018,9	147782,2	10390,1
L 0 4 3 6	178,35	11,60	903,98	131110,6	9218,0
L 0 4 3 8	200,36	7,80	804,67	116707,8	8205,4
L 0 4 2 4	175,26	10,30	919,91	133422,2	9380,5
L 0 4 2 6	180,25	8,90	894,45	129728,6	9120,8
L 0 4 2 8	200,54	7,90	803,95	116603,1	8198,0
L 0 4 1 4	165,25	10,00	975,64	141504,3	9948,7
L 0 4 1 6	169,96	7,90	948,6	137582,8	9673,0
L 0 4 1 8	200,31	6,90	804,87	116736,9	8207,4

Çizelge B 23. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve % 5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 1 4 3 4	163,98	12,80	960,82	139355,1	9797,6
L 1 4 3 6	175,60	10,60	907,38	131604,4	9252,7
L 1 4 3 8	202,26	8,30	789,81	114552,8	8053,9
L 1 4 2 4	86,48	10,50	928,21	134625,8	9465,1
L 1 4 2 6	184,57	9,00	835,1	121121,2	8515,7
L 1 4 2 8	206,43	8,10	778,22	112871,3	7935,6
L 1 4 1 4	167,10	9,00	934,73	135571,7	9531,6
L 1 4 1 6	183,49	8,20	847,42	122907,8	8641,3
L 1 4 1 8	206,02	7,40	784,02	113712,1	7994,7

Çizelge B 24. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve % 5.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU	Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
			Mpa	PSI	kg/cm ²
L 2 4 3 4	176,98	17,30	912,27	132313,7	9302,6
L 2 4 3 6	189,84	11,80	822,06	119229,5	8382,7
L 2 4 3 8	224,54	9,80	710,65	103071,3	7246,6
L 2 4 2 4	189,10	11,60	830,39	120438,1	8467,6
L 2 4 2 6	200,91	10,10	769,89	111662,7	7850,7
L 2 4 2 8	222,77	9,00	720,43	104490,0	7346,4
L 2 4 1 4	182,34	10,50	854,48	123932,5	8713,3
L 2 4 1 6	192,85	10,10	805,94	116891,2	8218,3
L 2 4 1 8	213,44	8,60	752,68	109166,7	7675,2

Çizelge B 25. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve % 6.0 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	3	4	3	4	289,29	16,00	543,27	78794,5	5539,8
L	3	4	3	6	308,28	12,50	502,69	72909,2	5126,0
L	3	4	3	8	323,38	11,00	482,4	69966,5	4919,1
L	3	4	2	4	256,78	11,30	606,85	88016,5	6188,2
L	3	4	2	6	285,34	9,80	548,88	79608,9	5597,1
L	3	4	2	8	309,66	8,20	517,73	75089,9	5279,3
L	3	4	1	4	242,75	10,30	640	92824,6	6526,2
L	3	4	1	6	259,09	8,70	593,45	86072,2	6051,5
L	3	4	1	8	287,55	8,10	555,22	80528,5	5661,7

Çizelge B 26. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve % 6.5 Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	4	4	3	4	203,51	16,70	764,82	110927,1	7798,9
L	4	4	3	6	225,75	12,40	684,02	99209,0	6975,1
L	4	4	3	8	250,92	10,90	635,66	92194,0	6481,9
L	4	4	2	4	215,59	11,90	715,18	103728,1	7292,8
L	4	4	2	6	234,06	11,10	657,76	95399,4	6707,2
L	4	4	2	8	243,14	9,30	653,95	94847,6	6668,4
L	4	4	1	4	206,40	11,10	753,95	109350,6	7688,1
L	4	4	1	6	213,91	10,70	719,17	104306,1	7333,4
L	4	4	1	8	238,37	9,40	682,21	98946,3	6956,6

Çizelge B 27. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve OptAC Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	5	4	3	4	200,19	15,70	836,37	121305,1	8528,6
L	5	4	3	6	221,86	13,60	748,33	108536,2	7630,8
L	5	4	3	8	265,69	10,80	620,26	89960,7	6324,9
L	5	4	2	4	201,68	14,50	788,36	114342,6	8039,1
L	5	4	2	6	220,45	11,60	718,62	104227,3	7327,9
L	5	4	2	8	247,45	9,60	726,05	105304,5	7403,6
L	5	4	1	4	186,78	12,60	850,5	123354,5	8672,7
L	5	4	1	6	207,92	10,80	780,94	113265,4	7963,3
L	5	4	1	8	228,40	9,00	707,93	102677,1	7218,9

Çizelge B 28. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları
(40 °C sıcaklık ve OptACv Bitüm Muhtevası)

DENEY KODU					Elastik Deformasyon $\mu\epsilon$	Faz Gecikmesi ms	Elastisite Modülü		
							Mpa	PSI	kg/cm ²
L	6	4	3	4	148,30	15,00	1071	155329,4	10920,7
L	6	4	3	6	162,93	12,10	946,87	137332,0	9655,4
L	6	4	3	8	188,68	10,90	831,3	120569,5	8476,9
L	6	4	2	4	147,20	11,00	1068,6	154987,8	10896,7
L	6	4	2	6	159,21	9,60	966,8	140222,1	9858,6
L	6	4	2	8	176,62	9,70	879,48	127558,2	8968,2
L	6	4	1	4	137,48	10,50	1121,1	162607,2	11432,4
L	6	4	1	6	154,10	9,50	1007,4	146107,4	10272,4
L	6	4	1	8	171,85	8,30	927,13	134468,2	9454,0

EK C. Statik Sünme Deneyi
Sonuçları

Çizelge C.1. 5 ve 15 °C Statik Sünme Deformasyonu (10^{-6} xin./in)

Süre (sn)	5 °C Sıcaklık							15 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)							Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	714	504	429	952	460	565	529	355	410	502	266	451	307	336
2	824	655	555	1144	560	641	680	399	452	560	308	518	333	386
3	897	782	655	1285	652	691	805	428	486	594	333	576	341	419
4	954	882	731	1402	727	734	914	451	519	635	366	618	358	445
5	1000	975	807	1503	778	767	1007	469	536	669	383	659	375	470
6	1040	1067	874	1586	828	793	1091	485	553	702	399	693	384	495
7	1075	1134	941	1661	878	801	1158	499	570	727	424	726	401	512
8	1107	1202	1008	1728	911	818	1208	512	603	753	441	760	401	529
9	1135	1261	1050	1795	953	835	1250	523	603	778	466	785	410	554
10	1161	1311	1101	1853	987	852	1284	534	620	786	466	810	410	562
11	1186	1361	1143	1903	1012	868	1317	543	637	803	491	835	427	579
12	1208	1403	1176	1953	1045	877	1334	552	653	819	499	860	427	587
13	1230	1445	1202	1995	1070	885	1359	561	653	836	516	885	427	596
14	1250	1479	1235	2028	1079	885	1376	569	670	844	532	910	435	612
15	1269	1504	1261	2062	1104	894	1384	576	678	870	549	927	444	621
16	1287	1538	1286	2095	1120	894	1401	583	687	886	549	952	444	646
17	1304	1555	1311	2120	1137	894	1409	590	704	895	566	977	452	646
18	1320	1580	1336	2145	1162	911	1426	597	712	920	582	993	452	663
19	1336	1605	1361	2179	1179	911	1443	603	720	928	582	1010	461	671
20	1351	1630	1370	2204	1187	911	1460	609	729	936	599	1027	469	680
21	1366	1647	1395	2229	1212	919	1468	615	737	953	616	1052	469	696
22	1380	1672	1420	2254	1229	927	1477	621	745	962	632	1068	469	705
23	1393	1689	1429	2279	1237	927	1493	626	754	978	632	1085	469	713
24	1406	1714	1454	2295	1254	936	1502	631	762	987	649	1102	478	721
25	1419	1731	1479	2321	1271	936	1527	636	771	1003	649	1119	478	730
26	1431	1748	1487	2329	1288	944	1527	641	779	1003	666	1135	486	747
27	1443	1773	1513	2354	1296	944	1544	646	787	1020	682	1152	486	747
28	1455	1782	1529	2371	1313	953	1552	650	796	1028	682	1169	495	755
29	1466	1798	1546	2396	1321	953	1560	655	796	1037	699	1185	495	772
30	1477	1824	1563	2412	1338	953	1569	659	812	1054	699	1202	495	780
31	1488	1840	1580	2421	1346	953	1586	664	812	1062	715	1219	495	780
32	1498	1849	1597	2437	1363	953	1594	668	829	1079	715	1235	512	789
33	1509	1874	1613	2454	1371	961	1602	672	829	1079	732	1252	512	797
34	1519	1882	1622	2462	1388	970	1611	676	829	1087	732	1269	512	805
35	1528	1899	1639	2479	1388	970	1628	680	846	1104	749	1277	512	814
36	1538	1916	1655	2496	1405	970	1636	684	846	1112	765	1294	520	822
37	1547	1933	1664	2504	1413	970	1644	687	854	1112	765	1311	520	831
38	1557	1941	1681	2521	1430	970	1653	691	863	1120	782	1327	520	831
39	1565	1966	1689	2529	1438	978	1661	695	863	1137	782	1327	529	847
40	1574	1975	1706	2554	1446	987	1669	698	879	1137	799	1344	529	847
41	1583	1983	1723	2554	1455	987	1678	701	879	1145	799	1361	529	856
42	1591	2008	1731	2563	1463	987	1686	705	888	1162	815	1377	538	864
44	1608	2025	1756	2588	1480	995	1703	711	896	1171	832	1394	538	872
45	1616	2034	1765	2596	1497	995	1711	715	905	1187	832	1411	538	881
46	1624	2042	1790	2604	1497	1003	1720	718	913	1187	849	1427	538	898
47	1632	2067	1798	2613	1505	1003	1728	721	913	1204	849	1436	538	898

48	1639	2076	1807	2621	1522	1003	1728	724	921	1204	865	1452	538	906
50	1654	2101	1832	2646	1538	1012	1753	730	930	1221	882	1477	546	923
51	1662	2109	1840	2646	1547	1012	1762	733	938	1229	882	1486	546	923
52	1669	2118	1857	2663	1547	1012	1770	736	946	1237	890	1503	555	931
54	1683	2151	1874	2679	1572	1020	1770	741	955	1254	899	1519	555	931
55	1690	2160	1891	2688	1572	1029	1787	744	955	1263	915	1536	555	948
56	1696	2168	1899	2696	1580	1029	1795	747	963	1263	915	1553	563	948
58	1710	2185	1924	2705	1597	1029	1804	752	972	1279	932	1569	563	956
59	1716	2202	1933	2713	1614	1029	1812	755	972	1288	940	1586	563	965
61	1729	2218	1950	2738	1622	1029	1820	760	988	1288	948	1603	563	973
63	1742	2244	1975	2746	1639	1046	1837	765	1005	1313	965	1619	563	982
64	1748	2252	1983	2755	1639	1046	1837	767	1005	1313	982	1636	572	990
66	1760	2269	2000	2771	1656	1046	1854	772	1005	1329	998	1661	580	998
68	1771	2294	2017	2771	1664	1046	1862	777	1022	1338	998	1686	580	1015
69	1777	2294	2025	2788	1664	1046	1871	779	1022	1346	1015	1694	580	1015
71	1789	2311	2042	2805	1681	1046	1879	783	1039	1355	1015	1711	580	1023
73	1800	2336	2067	2821	1689	1062	1888	788	1039	1380	1032	1736	589	1040
75	1811	2353	2084	2830	1706	1062	1896	792	1055	1380	1048	1753	597	1040
77	1821	2378	2109	2846	1714	1062	1904	796	1055	1396	1057	1778	597	1057
79	1832	2387	2126	2855	1731	1062	1913	801	1072	1405	1073	1795	597	1065
81	1842	2403	2134	2863	1739	1062	1921	805	1072	1421	1082	1820	606	1074
83	1852	2420	2160	2880	1756	1079	1930	809	1080	1430	1098	1845	606	1082
85	1862	2437	2176	2896	1764	1079	1938	813	1089	1430	1098	1861	606	1091
87	1872	2462	2193	2905	1773	1079	1946	817	1106	1446	1115	1878	606	1107
90	1886	2479	2218	2922	1789	1088	1963	822	1114	1455	1131	1903	623	1107
92	1895	2487	2235	2930	1798	1096	1971	826	1114	1472	1148	1920	623	1124
95	1909	2521	2252	2955	1806	1096	1980	831	1131	1480	1165	1945	623	1133
97	1918	2529	2269	2955	1823	1096	1988	835	1139	1497	1181	1970	623	1149
100	1931	2555	2286	2972	1831	1105	1997	840	1147	1513	1198	1987	631	1158
102	1940	2571	2311	2988	1848	1105	2005	844	1156	1522	1206	2003	631	1166
105	1952	2597	2336	3005	1848	1113	2013	849	1164	1538	1215	2037	631	1174
107	1961	2605	2345	3013	1865	1113	2022	852	1164	1547	1231	2045	631	1174
110	1973	2630	2370	3030	1881	1113	2030	857	1181	1555	1248	2078	640	1191
113	1985	2647	2387	3047	1890	1121	2030	862	1189	1572	1265	2095	648	1200
116	1996	2664	2403	3063	1898	1130	2047	866	1198	1580	1281	2129	648	1216
119	2008	2689	2420	3080	1915	1130	2047	871	1206	1597	1298	2145	648	1225
122	2019	2706	2445	3097	1923	1138	2072	875	1214	1614	1314	2170	648	1233
125	2030	2723	2462	3105	1940	1138	2081	880	1231	1614	1331	2187	666	1250
129	2045	2748	2487	3122	1948	1138	2089	885	1248	1639	1348	2220	666	1258
132	2055	2773	2504	3139	1965	1147	2089	890	1248	1647	1364	2237	666	1267
135	2066	2782	2521	3155	1965	1155	2097	894	1265	1656	1381	2262	666	1275
139	2079	2798	2555	3172	1982	1155	2106	899	1265	1672	1398	2295	674	1292
143	2093	2832	2571	3189	1990	1155	2114	905	1281	1697	1414	2329	674	1309
146	2102	2840	2580	3205	2007	1155	2114	908	1290	1697	1423	2346	683	1309
150	2115	2866	2605	3222	2015	1172	2122	914	1298	1714	1448	2371	683	1326
154	2128	2882	2622	3239	2032	1172	2148	919	1315	1722	1464	2396	691	1334
158	2140	2899	2639	3255	2040	1172	2148	923	1323	1739	1481	2421	691	1351
162	2152	2924	2672	3264	2057	1189	2156	928	1332	1756	1498	2454	691	1351
166	2164	2941	2681	3280	2065	1189	2164	933	1340	1764	1522	2479	700	1367
171	2179	2975	2706	3306	2082	1189	2173	939	1348	1781	1539	2513	708	1384
175	2190	2983	2731	3322	2090	1189	2181	943	1365	1798	1556	2529	708	1393
180	2204	3017	2748	3347	2107	1206	2198	949	1365	1806	1581	2563	708	1401

184	2215	3034	2756	3347	2115	1206	2198	953	1374	1823	1597	2588	717	1418
189	2228	3050	2790	3364	2132	1206	2206	959	1399	1839	1614	2621	717	1435
194	2241	3076	2807	3397	2140	1206	2215	964	1407	1848	1639	2646	725	1443
199	2254	3092	2832	3414	2149	1223	2223	969	1415	1865	1656	2671	734	1460
204	2267	3109	2849	3431	2166	1223	2240	974	1424	1881	1672	2705	734	1460
210	2282	3134	2866	3447	2182	1223	2240	980	1441	1898	1697	2730	734	1477
215	2294	3160	2891	3472	2191	1223	2248	985	1457	1906	1722	2763	742	1493
221	2308	3176	2908	3497	2207	1239	2257	990	1466	1923	1739	2796	751	1510
226	2320	3193	2924	3514	2216	1239	2265	995	1474	1940	1755	2821	751	1518
232	2334	3227	2950	3531	2232	1239	2265	1001	1491	1957	1789	2855	751	1527
238	2347	3244	2966	3556	2241	1256	2282	1006	1491	1973	1805	2888	751	1544
244	2361	3261	2983	3573	2249	1256	2290	1011	1508	1982	1822	2913	768	1560
251	2376	3286	3008	3606	2266	1256	2299	1017	1524	1998	1855	2947	768	1577
257	2388	3303	3017	3623	2274	1256	2299	1022	1533	2015	1872	2980	768	1586
264	2403	3336	3042	3639	2291	1273	2315	1028	1541	2032	1889	3005	776	1594
271	2417	3353	3067	3673	2299	1273	2324	1034	1558	2057	1913	3038	776	1611
278	2431	3370	3076	3689	2316	1273	2332	1039	1566	2065	1938	3072	785	1619
285	2445	3395	3092	3706	2333	1290	2332	1045	1583	2082	1963	3105	785	1636
292	2458	3412	3109	3740	2341	1290	2341	1050	1583	2099	1980	3130	794	1653
300	2474	3445	3134	3765	2358	1290	2357	1056	1600	2115	2013	3164	794	1669
308	2488	3462	3151	3790	2366	1298	2366	1062	1616	2132	2030	3197	802	1678
316	2503	3479	3176	3806	2383	1307	2366	1068	1633	2149	2063	3239	811	1703
324	2517	3504	3193	3831	2391	1307	2374	1074	1650	2157	2080	3272	811	1711
332	2531	3521	3202	3856	2408	1315	2383	1079	1650	2174	2113	3306	811	1720
341	2546	3538	3235	3881	2416	1324	2399	1085	1667	2191	2130	3331	811	1737
350	2561	3555	3252	3915	2433	1332	2399	1091	1683	2216	2163	3364	828	1753
359	2576	3588	3261	3932	2450	1332	2408	1097	1692	2232	2180	3397	828	1770
368	2591	3605	3286	3957	2458	1341	2416	1103	1700	2249	2205	3431	828	1787
378	2607	3630	3303	3982	2467	1349	2424	1109	1717	2266	2238	3472	836	1795
388	2622	3647	3319	4015	2475	1358	2424	1115	1734	2283	2255	3506	845	1812
398	2637	3664	3345	4048	2492	1358	2441	1122	1742	2299	2288	3539	845	1829
408	2652	3689	3353	4073	2508	1366	2450	1127	1759	2308	2313	3581	845	1846
419	2668	3706	3370	4107	2517	1374	2458	1134	1776	2341	2346	3606	853	1862
429	2683	3723	3395	4132	2533	1383	2458	1140	1792	2349	2363	3648	862	1871
441	2699	3748	3412	4157	2550	1383	2475	1146	1801	2375	2396	3681	870	1896
452	2715	3765	3420	4190	2559	1391	2483	1152	1809	2383	2429	3715	870	1913
464	2731	3782	3437	4224	2575	1400	2492	1159	1826	2416	2454	3756	879	1921
476	2747	3798	3462	4249	2592	1400	2500	1165	1834	2425	2479	3790	887	1938
488	2762	3824	3471	4274	2600	1408	2500	1171	1851	2441	2504	3823	887	1955
501	2779	3840	3496	4307	2609	1417	2517	1178	1859	2458	2537	3856	887	1971
514	2795	3849	3513	4341	2617	1433	2525	1184	1876	2483	2571	3881	896	1988
527	2811	3866	3521	4374	2634	1433	2534	1191	1893	2500	2596	3923	904	1997
541	2828	3891	3538	4407	2651	1433	2542	1197	1901	2517	2629	3965	904	2022
555	2844	3899	3555	4441	2659	1450	2559	1204	1918	2533	2654	3990	913	2039
569	2860	3916	3563	4474	2676	1450	2559	1210	1935	2550	2687	4032	922	2047
584	2877	3933	3588	4508	2684	1450	2567	1217	1951	2584	2704	4065	922	2064
599	2894	3950	3597	4541	2692	1467	2576	1224	1968	2592	2745	4098	922	2081
615	2912	3958	3613	4574	2709	1467	2592	1231	1968	2617	2779	4140	930	2097
630	2928	3975	3630	4608	2726	1484	2601	1237	1985	2634	2812	4174	939	2114
647	2945	3992	3647	4641	2742	1484	2609	1244	2002	2659	2837	4207	939	2131
664	2963	4000	3655	4683	2751	1484	2617	1251	2018	2676	2870	4249	939	2148
681	2980	4017	3681	4716	2768	1501	2626	1258	2035	2692	2903	4282	956	2164

698	2997	4025	3689	4750	2784	1518	2634	1265	2052	2717	2928	4316	956	2181
717	3015	4034	3706	4791	2793	1518	2651	1272	2060	2734	2962	4357	973	2206
735	3032	4042	3723	4825	2809	1518	2659	1279	2077	2751	2995	4391	973	2223
754	3050	4050	3731	4866	2826	1526	2668	1286	2094	2784	3020	4424	973	2232
774	3068	4076	3748	4900	2843	1535	2676	1293	2111	2801	3053	4466	973	2248
794	3086	4076	3765	4933	2860	1543	2693	1300	2127	2818	3087	4499	990	2265
814	3104	4092	3773	4983	2868	1551	2701	1307	2136	2843	3120	4533	990	2282
836	3123	4101	3790	5017	2885	1560	2710	1315	2161	2860	3153	4574	998	2299
857	3140	4109	3807	5050	2893	1568	2718	1322	2169	2885	3186	4608	1007	2324
879	3159	4126	3815	5100	2910	1568	2718	1329	2186	2901	3220	4641	1007	2341
902	3177	4126	3832	5134	2926	1577	2735	1337	2194	2935	3253	4674	1007	2357
926	3196	4134	3849	5167	2943	1585	2743	1344	2211	2943	3286	4716	1024	2374
950	3215	4151	3857	5209	2960	1602	2752	1352	2228	2968	3328	4750	1024	2391
974	3234	4160	3882	5250	2977	1602	2760	1359	2245	2993	3353	4783	1032	2399
1000	3253	4176	3891	5284	2985	1619	2777	1367	2261	3010	3386	4825	1041	2433
1025	3272	4176	3899	5326	3002	1619	2785	1374	2278	3027	3419	4858	1049	2441
1049	3289	4185	3916	5367	3018	1627	2794	1381	2295	3060	3461	4900	1058	2458
1079	3310	4185	3924	5409	3035	1636	2802	1390	2312	3077	3486	4933	1058	2483
1107	3330	4202	3950	5442	3035	1644	2810	1397	2328	3102	3527	4967	1067	2500
1136	3349	4210	3958	5484	3052	1653	2827	1405	2345	3127	3561	5000	1075	2517
1165	3369	4210	3966	5526	3069	1661	2836	1413	2353	3144	3594	5042	1075	2534
1196	3389	4227	3975	5559	3085	1669	2844	1421	2362	3177	3627	5067	1084	2550
1227	3409	4244	4000	5593	3102	1669	2861	1429	2387	3194	3669	5100	1092	2576
1258	3428	4244	4000	5643	3127	1686	2869	1437	2395	3211	3702	5142	1092	2592
1291	3449	4252	4025	5676	3127	1695	2869	1445	2420	3244	3727	5175	1109	2609
1325	3469	4269	4034	5718	3152	1703	2886	1453	2429	3261	3760	5209	1109	2626
1359	3490	4269	4042	5751	3169	1703	2894	1461	2454	3286	3802	5250	1109	2643
1394	3510	4277	4059	5785	3177	1720	2911	1469	2462	3303	3835	5284	1126	2659
1430	3531	4286	4067	5826	3186	1720	2919	1477	2479	3336	3877	5309	1126	2685
1467	3551	4294	4084	5860	3202	1737	2928	1486	2496	3361	3910	5342	1126	2701
1505	3572	4303	4092	5910	3227	1737	2936	1494	2513	3378	3952	5384	1143	2718
1544	3593	4311	4092	5935	3244	1754	2953	1502	2529	3411	3985	5417	1143	2735
1584	3614	4311	4109	5977	3261	1754	2953	1511	2546	3428	4010	5451	1160	2760
1625	3635	4328	4126	6010	3278	1771	2961	1519	2554	3445	4052	5492	1160	2768
1668	3657	4336	4134	6052	3294	1771	2978	1528	2580	3478	4085	5518	1160	2794
1711	3679	4336	4143	6085	3311	1788	2978	1536	2596	3503	4118	5551	1177	2819
1755	3700	4353	4151	6119	3328	1788	2995	1545	2613	3520	4160	5584	1177	2827
1801	3722	4353	4168	6144	3336	1804	3003	1554	2630	3554	4193	5609	1195	2852
1847	3744	4361	4176	6177	3353	1804	3012	1562	2638	3570	4235	5651	1195	2869
1895	3766	4370	4193	6210	3370	1821	3029	1571	2655	3595	4268	5684	1203	2886
1944	3788	4378	4202	6252	3386	1821	3037	1580	2672	3620	4301	5718	1212	2903
1995	3811	4395	4210	6285	3403	1830	3045	1589	2688	3645	4334	5751	1220	2928
2046	3833	4395	4218	6319	3428	1838	3054	1598	2705	3671	4376	5776	1229	2953
2100	3856	4395	4235	6352	3445	1847	3079	1607	2722	3687	4409	5818	1229	2961
2154	3878	4412	4244	6377	3462	1855	3079	1616	2739	3721	4451	5835	1237	2978
2210	3901	4412	4252	6402	3478	1863	3087	1625	2755	3746	4484	5876	1246	2995
2267	3924	4429	4261	6452	3495	1880	3104	1634	2772	3771	4526	5902	1254	3020
2326	3947	4429	4277	6469	3512	1880	3121	1643	2789	3796	4559	5935	1254	3037
2386	3970	4437	4286	6503	3520	1889	3121	1653	2806	3813	4601	5968	1263	3054
2448	3994	4445	4294	6528	3545	1897	3129	1662	2822	3838	4626	5993	1271	3070
2511	4017	4454	4303	6561	3562	1897	3146	1671	2839	3871	4659	6027	1288	3096
2576	4041	4462	4311	6594	3579	1914	3154	1681	2856	3888	4700	6060	1288	3112

2643	4065	4471	4319	6611	3595	1931	3163	1690	2873	3921	4734	6085	1297	3129
2712	4089	4487	4328	6644	3620	1931	3171	1700	2889	3938	4767	6119	1305	3146
2782	4113	4487	4345	6669	3637	1948	3180	1709	2906	3963	4809	6144	1314	3171
2854	4137	4487	4345	6694	3654	1948	3196	1719	2915	3997	4850	6177	1323	3188
2928	4162	4504	4353	6728	3671	1956	3205	1729	2931	4013	4875	6202	1323	3205
3004	4186	4504	4370	6745	3687	1965	3213	1739	2956	4047	4908	6235	1340	3221
3082	4211	4513	4378	6778	3704	1981	3213	1749	2965	4072	4950	6260	1340	3238
3162	4236	4521	4387	6795	3729	1990	3230	1758	2990	4089	4983	6294	1357	3255
3230	4257	4529	4395	6828	3746	1990	3238	1767	3007	4122	5008	6327	1357	3280
3328	4286	4538	4403	6845	3763	2007	3247	1778	3015	4147	5050	6352	1374	3297
3414	4311	4546	4403	6861	3779	2007	3263	1788	3023	4164	5083	6386	1374	3314
3503	4337	4555	4420	6895	3804	2024	3272	1799	3049	4197	5125	6411	1391	3339
3593	4362	4563	4420	6920	3821	2024	3272	1809	3065	4222	5158	6444	1391	3347
GD	4042	4252	3990	6553	3445	1619	2890	1580	2750	3804	4790	5935	1041	2987

GD.Geri dönen deformasyon

Çizelge C.2. 25 ve 40 °C Statik Sünme Deformasyonu (10^{-6} xin./in)

Süre	25 °C Sıcaklık							40 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)							Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	218	320	455	614	668	606	453	686	558	713	842	814	393	705
2	220	354	523	715	785	682	529	726	584	772	900	872	443	755
3	225	388	573	791	876	741	570	752	610	814	942	923	493	789
4	230	413	616	859	952	791	621	770	627	856	967	956	527	814
5	235	430	658	909	1035	833	654	785	644	889	1008	990	543	847
6	252	447	691	960	1093	867	688	797	653	914	1033	1023	577	856
7	269	464	725	1010	1152	901	713	807	670	931	1050	1040	594	881
8	286	481	742	1061	1202	934	738	817	670	956	1058	1057	627	898
9	302	497	767	1094	1252	960	763	825	679	973	1075	1074	644	906
10	319	514	793	1128	1294	985	780	832	687	982	1083	1091	661	914
11	319	514	818	1162	1344	1002	797	839	696	990	1100	1099	677	923
12	336	531	835	1195	1386	1027	814	845	696	1007	1108	1107	694	923
13	345	540	852	1229	1427	1052	839	851	696	1023	1108	1116	711	940
14	353	548	868	1263	1477	1077	856	856	704	1023	1117	1133	727	948
15	361	556	894	1296	1511	1094	881	862	704	1040	1125	1133	736	948
16	370	565	911	1322	1553	1120	898	866	704	1049	1133	1149	744	956
17	378	573	927	1347	1586	1136	914	871	713	1049	1142	1149	761	965
18	395	590	944	1380	1628	1162	923	875	713	1065	1150	1166	778	973
19	395	590	953	1406	1661	1178	940	879	722	1065	1158	1166	794	973
20	404	599	970	1431	1686	1187	956	883	722	1074	1158	1183	794	982
21	412	607	987	1456	1720	1212	965	887	722	1082	1167	1183	811	990
22	412	607	1003	1481	1753	1229	982	890	730	1091	1167	1183	819	990
23	429	624	1020	1498	1786	1246	998	894	730	1099	1175	1200	836	990
24	429	624	1037	1532	1811	1254	1007	897	730	1099	1183	1200	844	998
25	437	632	1046	1549	1845	1279	1023	900	730	1107	1183	1208	853	1007
26	446	641	1062	1566	1878	1296	1032	903	730	1124	1183	1216	870	1015
27	446	641	1071	1591	1903	1305	1049	906	739	1124	1192	1216	878	1015
28	463	658	1079	1616	1937	1322	1065	909	747	1124	1192	1216	886	1015
29	463	658	1096	1633	1962	1338	1065	912	739	1124	1208	1233	895	1015
30	471	666	1113	1650	1995	1347	1082	914	747	1141	1208	1233	911	1015

31	480	675	1121	1675	2020	1364	1091	917	747	1141	1208	1242	911	1032
32	488	683	1138	1700	2045	1380	1099	919	747	1158	1208	1250	928	1032
33	488	683	1147	1717	2078	1389	1116	922	756	1158	1217	1250	928	1032
34	496	691	1164	1734	2104	1406	1133	924	747	1158	1217	1258	936	1040
35	505	700	1172	1751	2120	1414	1133	927	747	1158	1225	1258	945	1040
36	505	700	1180	1776	2154	1431	1149	929	765	1166	1233	1267	962	1040
37	505	700	1189	1785	2179	1448	1149	931	765	1166	1225	1267	962	1040
38	522	717	1206	1810	2195	1456	1166	933	765	1174	1233	1275	978	1049
39	522	717	1206	1827	2220	1465	1183	935	756	1183	1233	1275	978	1057
40	522	717	1223	1835	2245	1481	1183	937	765	1183	1233	1284	995	1057
41	539	734	1239	1852	2270	1490	1200	939	765	1183	1250	1284	995	1057
42	539	734	1248	1869	2287	1507	1200	941	765	1183	1250	1292	1003	1057
44	547	742	1265	1911	2337	1532	1216	945	765	1200	1250	1292	1020	1065
45	555	750	1273	1919	2362	1540	1233	947	765	1200	1250	1300	1028	1065
46	555	750	1282	1936	2379	1549	1233	949	773	1200	1258	1300	1028	1074
47	564	759	1298	1953	2404	1557	1250	950	773	1200	1258	1309	1045	1074
48	572	767	1298	1970	2429	1574	1250	952	773	1208	1258	1309	1045	1074
50	581	776	1315	2003	2462	1591	1267	956	773	1216	1258	1309	1062	1082
51	581	776	1332	2020	2479	1599	1284	957	773	1216	1267	1317	1079	1082
52	589	784	1349	2037	2504	1616	1284	959	773	1216	1267	1326	1079	1082
54	598	793	1358	2054	2538	1641	1309	962	773	1233	1275	1326	1095	1082
55	598	793	1366	2071	2571	1641	1317	963	773	1233	1275	1334	1095	1099
56	606	801	1374	2088	2588	1658	1317	965	773	1233	1275	1334	1112	1099
58	614	809	1391	2104	2621	1667	1334	968	790	1242	1275	1342	1112	1099
59	614	809	1400	2121	2638	1684	1342	969	790	1242	1283	1342	1129	1099
61	623	818	1417	2155	2679	1709	1359	972	790	1250	1292	1351	1129	1099
63	631	826	1433	2172	2713	1726	1367	975	790	1258	1292	1351	1145	1107
64	631	826	1442	2189	2730	1734	1376	976	790	1258	1292	1359	1154	1107
66	648	843	1459	2205	2763	1751	1393	979	790	1258	1300	1359	1162	1107
68	648	843	1476	2239	2805	1759	1401	981	799	1275	1300	1359	1179	1116
69	657	852	1476	2247	2813	1768	1409	983	799	1275	1300	1359	1179	1116
71	665	860	1492	2273	2846	1785	1426	985	799	1275	1300	1376	1196	1116
73	673	868	1509	2290	2880	1793	1435	987	799	1275	1300	1376	1196	1124
75	682	877	1518	2315	2913	1818	1443	990	799	1275	1317	1376	1212	1124
77	690	885	1535	2340	2947	1835	1460	992	799	1292	1317	1384	1229	1124
79	690	885	1551	2357	2972	1852	1477	994	799	1292	1317	1393	1229	1133
81	707	902	1568	2374	3005	1860	1485	996	799	1292	1317	1393	1246	1133
83	707	902	1585	2391	3038	1877	1493	998	816	1300	1325	1393	1246	1141
85	716	911	1585	2424	3063	1894	1510	1001	799	1300	1325	1393	1263	1141
87	724	919	1602	2441	3088	1902	1510	1003	816	1309	1333	1409	1271	1141
90	732	927	1619	2475	3139	1928	1527	1006	816	1317	1333	1409	1288	1141
92	741	936	1636	2492	3164	1944	1544	1007	816	1317	1342	1409	1296	1141
95	749	944	1644	2517	3205	1970	1560	1010	816	1317	1342	1409	1313	1149
97	749	944	1661	2525	3230	1987	1569	1012	816	1326	1342	1426	1313	1158
100	758	953	1678	2559	3264	1995	1586	1015	816	1334	1342	1426	1329	1158
102	766	961	1695	2576	3289	2012	1586	1017	816	1334	1358	1426	1338	1149
105	775	970	1703	2609	3331	2037	1602	1019	825	1334	1358	1426	1346	1166
107	783	978	1712	2618	3356	2054	1619	1021	825	1334	1358	1435	1355	1166
110	792	987	1728	2643	3389	2062	1628	1023	825	1351	1358	1443	1363	1166
113	800	995	1745	2660	3422	2079	1636	1026	825	1351	1358	1443	1380	1174
116	808	1003	1762	2685	3456	2096	1653	1028	826	1351	1358	1451	1396	1183
119	817	1012	1779	2710	3497	2121	1669	1030	833	1351	1367	1451	1405	1183

122	825	1020	1788	2727	3531	2138	1678	1033	833	1359	1367	1460	1413	1183
125	834	1029	1804	2761	3564	2155	1686	1035	833	1367	1375	1460	1430	1183
129	842	1037	1821	2778	3598	2172	1703	1038	838	1376	1383	1460	1438	1183
132	851	1046	1838	2803	3623	2197	1711	1040	840	1376	1383	1468	1455	1191
135	851	1046	1855	2828	3656	2205	1728	1042	840	1384	1383	1477	1455	1191
139	867	1062	1872	2845	3706	2231	1745	1044	840	1384	1392	1477	1472	1191
143	876	1071	1889	2879	3740	2256	1753	1047	840	1384	1392	1477	1488	1191
146	893	1088	1897	2896	3765	2273	1762	1049	845	1393	1400	1485	1497	1200
150	893	1088	1914	2912	3806	2281	1779	1051	845	1393	1400	1493	1505	1208
154	893	1088	1931	2929	3848	2306	1795	1054	845	1393	1400	1493	1522	1208
158	910	1105	1948	2963	3881	2323	1804	1056	850	1409	1408	1493	1538	1208
162	926	1121	1965	2980	3907	2340	1820	1058	850	1409	1408	1510	1538	1208
166	926	1121	1981	2997	3940	2365	1829	1061	850	1409	1408	1510	1555	1225
171	943	1138	1998	3030	3990	2382	1837	1063	855	1409	1417	1510	1564	1225
175	943	1138	2015	3047	4015	2407	1854	1066	859	1426	1425	1510	1572	1225
180	952	1147	2024	3081	4057	2424	1871	1068	859	1426	1425	1518	1589	1225
184	969	1164	2040	3098	4082	2449	1879	1070	859	1426	1425	1527	1605	1225
189	969	1164	2057	3114	4115	2466	1888	1073	862	1426	1425	1527	1614	1233
194	985	1180	2074	3148	4165	2475	1904	1075	868	1435	1433	1535	1622	1233
199	985	1180	2091	3165	4199	2500	1921	1078	868	1443	1442	1535	1630	1233
204	1002	1197	2108	3182	4224	2517	1930	1080	868	1443	1442	1535	1647	1242
210	1011	1206	2125	3207	4265	2542	1938	1083	868	1451	1442	1552	1664	1242
215	1019	1214	2133	3232	4307	2559	1955	1085	868	1451	1442	1552	1664	1242
221	1036	1231	2150	3258	4341	2584	1963	1088	876	1460	1442	1552	1681	1250
226	1036	1231	2167	3274	4366	2601	1980	1090	885	1460	1450	1552	1697	1250
232	1044	1239	2184	3300	4407	2626	1997	1092	885	1460	1450	1560	1714	1250
238	1061	1256	2201	3316	4441	2643	2005	1095	885	1468	1450	1569	1714	1250
244	1070	1265	2218	3342	4482	2660	2013	1097	885	1468	1467	1569	1731	1267
251	1078	1273	2234	3359	4516	2685	2030	1100	885	1468	1467	1577	1747	1267
257	1078	1273	2243	3392	4549	2710	2047	1102	885	1485	1467	1577	1747	1267
264	1095	1290	2260	3409	4583	2727	2064	1105	885	1485	1467	1586	1764	1267
271	1112	1307	2277	3426	4624	2744	2064	1107	885	1485	1475	1594	1781	1275
278	1112	1307	2293	3451	4658	2769	2081	1110	902	1485	1475	1594	1789	1275
285	1120	1315	2310	3476	4691	2786	2097	1112	902	1502	1483	1594	1798	1284
292	1137	1332	2327	3493	4725	2811	2106	1114	902	1502	1483	1602	1814	1284
300	1146	1341	2336	3519	4766	2828	2114	1117	902	1502	1483	1602	1831	1284
308	1154	1349	2361	3535	4800	2854	2131	1120	902	1502	1492	1602	1839	1292
316	1171	1366	2361	3561	4825	2870	2139	1122	902	1510	1492	1619	1848	1292
324	1171	1366	2378	3577	4866	2896	2156	1125	902	1518	1492	1619	1856	1292
332	1175	1370	2403	3603	4900	2912	2173	1127	911	1518	1500	1619	1873	1300
341	1205	1400	2411	3620	4942	2938	2173	1130	911	1527	1508	1619	1890	1292
350	1215	1410	2428	3636	4967	2955	2190	1132	919	1527	1508	1636	1890	1300
359	1215	1410	2445	3662	5000	2980	2206	1135	911	1527	1508	1636	1906	1309
368	1245	1440	2454	3678	5033	2997	2206	1137	919	1535	1508	1636	1923	1309
378	1265	1460	2470	3704	5067	3013	2223	1140	919	1544	1517	1644	1931	1309
388	1285	1480	2487	3729	5100	3039	2240	1143	919	1544	1517	1636	1940	1309
398	1265	1460	2504	3746	5142	3064	2248	1145	928	1544	1525	1653	1957	1309
408	1285	1480	2521	3763	5175	3072	2257	1148	928	1544	1525	1653	1973	1317
419	1295	1490	2530	3779	5209	3106	2273	1150	928	1544	1533	1653	1982	1326
429	1335	1530	2546	3805	5234	3123	2290	1153	928	1560	1533	1661	1990	1326
441	1325	1520	2563	3822	5267	3148	2299	1155	928	1560	1533	1669	1998	1326
452	1385	1580	2580	3838	5301	3157	2315	1158	928	1560	1550	1669	2015	1334

464	1425	1620	2589	3864	5334	3182	2324	1161	945	1560	1533	1669	2023	1334
476	1395	1590	2614	3872	5367	3199	2332	1163	945	1569	1550	1686	2032	1342
488	1445	1640	2614	3906	5401	3215	2332	1166	945	1569	1550	1686	2048	1342
501	1465	1660	2639	3923	5434	3241	2349	1169	945	1577	1550	1686	2065	1351
514	1425	1620	2656	3939	5467	3258	2366	1171	945	1577	1558	1686	2074	1351
527	1475	1670	2664	3956	5492	3291	2374	1174	945	1586	1558	1686	2082	1351
541	1445	1640	2681	3973	5534	3300	2383	1176	945	1586	1558	1703	2090	1351
555	1505	1700	2690	3998	5551	3316	2399	1179	945	1594	1567	1703	2107	1351
569	1535	1730	2707	4015	5584	3342	2408	1182	954	1594	1567	1703	2115	1351
584	1535	1730	2723	4032	5618	3359	2424	1184	962	1602	1575	1720	2124	1359
599	1535	1730	2732	4049	5651	3384	2424	1187	962	1602	1575	1720	2140	1367
615	1555	1750	2749	4066	5676	3401	2441	1190	962	1602	1575	1720	2149	1367
630	1585	1780	2757	4082	5710	3426	2458	1192	962	1602	1583	1720	2157	1367
647	1605	1800	2774	4099	5743	3443	2458	1195	962	1611	1592	1720	2174	1367
664	1605	1800	2791	4125	5768	3460	2475	1198	962	1619	1592	1737	2174	1376
681	1645	1840	2799	4141	5801	3485	2492	1201	971	1619	1592	1737	2191	1376
698	1645	1840	2816	4158	5826	3502	2492	1203	971	1619	1600	1737	2199	1384
717	1625	1820	2833	4175	5860	3527	2508	1206	979	1619	1600	1737	2216	1384
735	1695	1890	2833	4192	5893	3544	2517	1209	971	1636	1600	1737	2216	1384
754	1715	1910	2850	4209	5918	3561	2525	1211	979	1628	1600	1745	2232	1384
774	1675	1870	2867	4226	5943	3586	2534	1214	979	1636	1608	1753	2232	1393
794	1735	1930	2884	4242	5977	3603	2542	1217	988	1636	1617	1753	2249	1393
814	1715	1910	2892	4259	6002	3620	2550	1220	988	1636	1617	1753	2266	1393
836	1755	1950	2909	4268	6035	3645	2567	1223	988	1644	1617	1762	2266	1401
857	1765	1960	2917	4293	6052	3662	2576	1225	988	1653	1617	1770	2283	1409
879	1803	1998	2926	4310	6085	3678	2584	1228	988	1653	1625	1770	2291	1409
902	1812	2007	2943	4318	6119	3704	2601	1231	1005	1653	1625	1779	2299	1409
926	1812	2007	2951	4335	6144	3721	2601	1234	1005	1653	1633	1779	2308	1409
950	1812	1990	2968	4352	6169	3737	2617	1236	1005	1661	1642	1787	2324	1409
974	1812	2032	2976	4369	6194	3763	2617	1239	1005	1661	1642	1787	2333	1409
1000	1812	2032	2993	4386	6227	3779	2634	1242	1005	1669	1642	1787	2341	1426
1025	1812	2049	2993	4402	6244	3796	2651	1245	1005	1669	1642	1795	2349	1426
1049	1812	2090	3010	4411	6277	3822	2651	1247	1005	1669	1650	1804	2358	1426
1079	1829	2100	3027	4428	6302	3838	2659	1250	1022	1678	1650	1804	2375	1426
1107	1829	2110	3044	4444	6319	3847	2668	1253	1022	1678	1658	1804	2375	1426
1136	1829	2125	3044	4461	6352	3872	2685	1256	1022	1686	1658	1804	2391	1435
1165	1829	2150	3061	4470	6377	3889	2685	1259	1022	1686	1658	1812	2400	1435
1196	1829	2167	3069	4487	6394	3906	2693	1262	1022	1686	1667	1820	2408	1443
1227	1838	2201	3078	4503	6427	3923	2710	1265	1031	1695	1675	1820	2416	1443
1258	1838	2209	3094	4512	6444	3939	2710	1268	1031	1695	1683	1820	2433	1443
1291	1838	2226	3103	4529	6469	3965	2727	1270	1031	1703	1683	1829	2433	1443
1325	1847	2226	3120	4545	6503	3981	2727	1273	1040	1703	1683	1837	2450	1451
1359	1847	2243	3128	4562	6519	3998	2743	1276	1040	1703	1683	1837	2450	1451
1394	1847	2243	3137	4571	6536	4015	2743	1279	1040	1711	1692	1837	2467	1451
1430	1855	2260	3153	4588	6569	4040	2760	1282	1048	1711	1700	1837	2467	1451
1467	1855	2268	3162	4604	6586	4049	2760	1285	1048	1711	1692	1846	2483	1460
1505	1855	2285	3170	4613	6619	4074	2777	1288	1048	1711	1700	1854	2483	1468
1544	1864	2285	3179	4630	6636	4091	2777	1291	1057	1711	1708	1854	2500	1468
1584	1864	2285	3187	4638	6653	4099	2794	1294	1057	1728	1708	1862	2508	1468
1625	1864	2302	3204	4655	6678	4116	2794	1297	1057	1728	1708	1871	2517	1468
1668	1872	2302	3221	4663	6711	4133	2810	1300	1065	1728	1708	1871	2525	1468
1711	1872	2319	3221	4680	6728	4158	2819	1303	1065	1728	1708	1871	2533	1468

1755	1872	2319	3229	4697	6745	4175	2819	1305	1065	1728	1717	1871	2542	1485
1801	1881	2336	3238	4714	6761	4192	2836	1308	1074	1728	1725	1871	2559	1485
1847	1872	2336	3255	4731	6786	4209	2836	1311	1065	1745	1725	1879	2559	1485
1895	1881	2344	3263	4731	6803	4217	2844	1314	1074	1745	1725	1888	2559	1485
1944	1881	2352	3272	4747	6836	4234	2852	1317	1074	1745	1733	1888	2575	1485
1995	1889	2352	3288	4764	6853	4251	2861	1320	1082	1745	1742	1888	2575	1485
2046	1889	2361	3288	4781	6870	4268	2869	1323	1082	1745	1742	1888	2592	1493
2100	1889	2361	3297	4790	6895	4285	2869	1326	1082	1762	1742	1904	2600	1502
2154	1889	2369	3305	4806	6912	4293	2886	1329	1082	1762	1750	1904	2600	1502
2210	1889	2369	3322	4823	6928	4310	2886	1333	1082	1762	1750	1904	2617	1502
2267	1898	2386	3331	4832	6945	4327	2903	1336	1091	1770	1750	1913	2617	1510
2326	1907	2395	3339	4848	6970	4343	2903	1339	1100	1770	1750	1913	2634	1510
2386	1907	2395	3347	4857	6987	4360	2903	1342	1100	1779	1750	1921	2634	1510
2448	1907	2411	3356	4874	7003	4369	2919	1345	1100	1770	1767	1921	2651	1510
2511	1907	2411	3364	4891	7020	4386	2919	1348	1100	1779	1767	1921	2651	1510
2576	1907	2420	3381	4891	7037	4402	2928	1351	1100	1779	1775	1921	2651	1510
2643	1924	2428	3381	4907	7062	4419	2936	1354	1117	1779	1775	1930	2667	1510
2712	1915	2428	3390	4924	7070	4436	2945	1357	1108	1779	1775	1938	2676	1527
2782	1924	2428	3398	4924	7104	4444	2953	1360	1117	1787	1783	1938	2684	1527
2854	1924	2437	3398	4941	7120	4461	2961	1363	1117	1787	1783	1938	2684	1527
2928	1924	2445	3415	4958	7137	4478	2961	1366	1117	1787	1792	1946	2692	1527
3004	1924	2445	3423	4966	7154	4487	2961	1369	1117	1795	1792	1955	2701	1527
3082	1941	2454	3432	4975	7162	4495	2978	1373	1134	1795	1792	1955	2709	1535
3162	1941	2462	3432	4992	7179	4512	2978	1376	1134	1804	1792	1955	2709	1527
3230	1941	2462	3449	5008	7195	4529	2978	1378	1134	1804	1800	1955	2726	1535
3328	1941	2462	3449	5008	7212	4537	2995	1382	1134	1804	1800	1963	2726	1544
3414	1941	2470	3465	5025	7229	4554	2995	1385	1134	1804	1808	1971	2734	1544
3503	1941	2470	3482	5042	7254	4571	3003	1388	1134	1812	1808	1971	2742	1544
3593	1950	2496	3482	5051	7270	4579	3012	1391	1143	1820	1808	1971	2742	1544
GD	1630	2032	2892	4386	6528	3965	2685	1102	750	1250	1242	1342	2315	982

GD: Geri dönen deformasyon

Çizelge C.3.Statik Sünme Modülü (psi) (5-15-25-40 °C)

Süre (sn)	5 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	50784,3	71944,4	84522,1	38088,2	78826,1	64177,0	68544,4
3	44004,9	46368,3	55358,8	28217,9	55613,5	52474,7	45043,5
10	40423,6	27658,3	32933,7	19568,3	36737,6	42558,7	28239,9
30	38008,4	19879,4	23199,0	15033,2	27100,1	38048,3	23110,3
100	36260,0	14191,8	15861,8	12200,5	19803,4	32814,5	18157,2
1000	34865,4	8683,0	9318,9	6862,2	12147,4	22396,5	13057,3
3600	33730,2	7946,5	8203,6	5239,9	9489,7	17915,0	11081,9
Süre (sn)	15 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	102140,8	88439,0	72231,1	80399,1	136315,8	118110,7	107916,7
3	90877,2	74609,1	61043,8	62951,4	108888,9	106334,3	86539,4
10	84719,6	58483,9	46132,3	44765,4	77811,2	88439,0	64519,6
30	80399,1	44655,2	34402,3	30166,4	51874,1	73252,5	46487,2
100	77313,4	31612,9	23965,6	18248,6	30267,1	57464,3	31312,6
1000	74762,9	16037,2	12046,5	7515,0	10708,8	34831,9	14903,4
3600	72665,3	11830,3	8588,3	5626,9	7029,9	26067,6	10833,6
Süre (sn)	25 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	166330,3	113312,5	79692,3	59055,4	54281,4	59835,0	80044,2
3	161155,6	93453,6	63281,0	45840,7	41392,7	48933,9	63614,0
10	113667,7	70544,7	45725,1	32145,4	28021,6	36812,2	46487,2
30	76985,1	54444,4	32578,6	21975,8	18175,4	26919,1	33512,0
100	47836,4	38048,3	21609,1	14169,6	11109,1	18175,4	22862,5
1000	20011,0	17844,5	12114,9	8267,2	5823,0	9595,1	13766,1
3600	18594,9	14527,2	10413,6	7178,8	4987,6	7918,8	12038,5
Süre (sn)	40 °C Sıcaklık						
	Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	52857,1	64982,1	50855,5	43064,1	44545,5	92264,6	51432,6
3	48218,1	59442,6	44545,5	38492,6	39284,9	73549,7	45956,9
10	43581,7	52780,2	36924,6	33481,1	33235,6	54856,3	39671,8
30	39671,8	48540,8	31779,1	30016,6	29407,9	39802,4	35724,1
100	35724,1	44436,3	27181,4	27019,4	25427,8	27283,7	31312,6
1000	29194,8	36079,6	21725,6	22082,8	20291,0	15489,1	25427,8
3600	26067,6	31723,5	19923,1	20055,3	18396,8	13223,9	23484,5

**EK D. Tekrarlı Sünme Deneyi
Sonuçları**

Çizelge D.1 Tekrarlı Sünme Deformasyonu (in./in x 10⁻⁶)

Vuruş Adedi	Bitüm Muhtevası (%)						
	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	5,20	5,26
1	170,5	189,6	83,6	75	415,8	60,4	61,6
2	175,3	384,4	170,8	194	752,8	184,6	162,8
3	185,6	514,4	262	296,6	1037,2	315,4	269,4
4	189,4	612,4	340,4	382,2	1273	424,8	346
5	195,3	689,8	405	463,8	1481,6	508,6	407
6	200,4	759	460	536	1657	580,8	463
7	205,5	815,8	510,8	596,6	1813,2	651	515,2
8	280,2	862,8	554,4	655,2	1963,2	709,6	564,6
9	293,6	911,8	603	706	2096,4	762,6	613,6
10	341,0	948,8	638,4	754,6	2221,2	815,2	653
11	383,9	983,8	675,4	797,2	2342,4	860	684,6
12	423,1	1023,4	714,6	844	2447,6	899	722
13	459,1	1056,2	744,2	881	2562,8	944	759,4
14	492,5	1081,6	777	916,2	2652,8	977,2	794,8
15	523,5	1103,2	797	955	2750,6	1019,8	814,4
16	552,5	1128,6	830	986,2	2840,4	1045,4	852
17	579,8	1157,8	857,2	1019,2	2928,2	1078,4	873,8
18	605,5	1179,4	878,8	1054	3014,2	1117,6	903,2
19	629,9	1199	900,4	1079,6	3090,4	1143	928,8
20	653,0	1222,4	927,8	1112,6	3167	1166,2	952,4
21	674,9	1239,8	953,2	1144	3242,8	1193,6	980
22	695,8	1261,4	968,8	1163,2	3319,2	1217	1000
23	715,9	1277,2	996,4	1192,4	3383,6	1244,2	1023,2
24	735,0	1298,4	1021,6	1216	3452,2	1269,8	1043
25	753,4	1310,2	1039,2	1247,2	3524,2	1292,8	1064,8
26	771,0	1330	1056,8	1266,8	3584,8	1310,6	1088,4
27	788,0	1347,4	1080,4	1294	3645,6	1334,2	1104,2
28	804,4	1365	1096	1311,2	3708,2	1353,4	1127,8
29	820,2	1374,8	1115,4	1332,8	3767	1380,8	1139,4
30	835,4	1388,4	1127	1360	3827,6	1398,4	1167,4
31	850,2	1398	1146,6	1381,2	3880,4	1414	1185
32	864,5	1419,6	1168	1395	3941	1435,2	1196,6
33	878,3	1425,4	1179,8	1418,4	3992	1454,8	1218,4
34	891,7	1439,2	1197,6	1434	4046,8	1472,2	1226,4
35	904,8	1456,6	1213	1447,6	4095,4	1487,8	1246
36	917,5	1466,6	1234,6	1474,8	4148,2	1507,2	1263,8
37	929,8	1476,4	1252	1488,4	4193,2	1523	1283,6
38	941,8	1484,2	1265,8	1506	4240,2	1538,6	1293,4
39	953,5	1502	1281,4	1523,6	4283,2	1552	1303,2
40	964,9	1513,4	1293,2	1546,8	4336	1571,4	1321
41	976,0	1521,4	1307	1560,6	4376,8	1587	1342,6
42	986,8	1533	1320,8	1574,4	4422,2	1598,8	1360,2
44	1007,8	1548,6	1349,8	1609,4	4510,2	1632	1391,8
45	1017,9	1560,6	1369,4	1623	4551,4	1647,4	1407,8
46	1027,8	1570	1379,2	1638,6	4588,6	1661,2	1423,4
47	1037,4	1579,6	1392,8	1650,4	4629,8	1670,8	1439,2
48	1046,9	1591,4	1404,4	1667,8	4673,2	1690,2	1447,2

50	1065,3	1611,2	1433,8	1696,8	4741,6	1713,8	1472,8
51	1074,2	1615	1449,2	1710,6	4784,6	1725,4	1494,6
52	1082,9	1622,8	1457,2	1728,4	4823,8	1737	1500,4
54	1099,9	1642,4	1484,8	1759,4	4892,2	1766,2	1528
55	1108,2	1654,2	1494,6	1765,4	4931,6	1772,2	1537,8
56	1116,3	1656,2	1502,2	1780,8	4959	1781,6	1551,4
58	1132,1	1673,4	1529,6	1808,2	5027,6	1803,2	1571,2
59	1139,8	1685,4	1539	1821,6	5062,6	1815	1579,2
61	1154,8	1695	1556,8	1843,2	5125,2	1840,2	1610,8
63	1169,3	1710,6	1590	1866,8	5190	1856	1628,4
64	1176,4	1718,2	1594	1880,2	5223,4	1871,2	1640,4
66	1190,2	1730	1615,4	1897,8	5282,2	1894,8	1660
68	1203,7	1745,8	1644,6	1929	5338,8	1916,2	1677,4
69	1210,2	1751,8	1648,6	1940,6	5372,2	1924	1687,4
71	1223,1	1773	1672	1962,2	5429	1941,6	1705,4
73	1235,6	1777	1685,6	1981,8	5480	1957,2	1721
75	1247,7	1790,6	1705,4	2001	5534,8	1977	1742,8
77	1259,6	1810,2	1730,4	2026,6	5585,6	1996,4	1764,4
79	1271,1	1814	1748	2051,6	5636,6	2012	1782
81	1282,4	1829,8	1761,8	2069,6	5687,6	2027,4	1795,6
83	1293,4	1837,6	1773,4	2088,8	5738,4	2045,2	1811,6
85	1304,1	1849	1800,6	2106,2	5783,6	2062,6	1823,4
87	1314,5	1860,8	1818,2	2127,6	5832,8	2080,2	1843,4
90	1329,8	1880,6	1849,8	2157	5901,6	2100	1864,8
92	1339,7	1888,2	1861,6	2172,8	5944,8	2117,6	1880,6
95	1354,1	1908	1887	2199,8	6013,4	2141	1908,4
97	1363,5	1912	1904,4	2225,2	6054,6	2154,8	1923,8
100	1377,2	1929,2	1929,8	2250,6	6107,6	2176	1941,6
102	1386,1	1945	1947,4	2262,2	6156,8	2187,8	1953,4
105	1399,2	1952,8	1965	2289,6	6213,8	2211,4	1977,2
107	1407,7	1966,6	1982,2	2306,8	6255	2223	1990,8
110	1420,1	1974,4	2010	2334,2	6313,6	2236,6	2002,6
113	1432,2	1990	2029,2	2347,8	6372,8	2260,2	2022,2
116	1444,0	1999,8	2041	2375,2	6421,8	2273,8	2044
119	1455,5	2011,6	2068,4	2408,2	6472,6	2291,4	2065,4
122	1466,7	2029,4	2093,6	2426	6525,8	2309	2079,2
125	1477,6	2037,2	2103,6	2443	6574,6	2332,4	2100,8
129	1491,8	2060,6	2136,8	2474,6	6639,4	2348,2	2116,6
132	1502,1	2068,4	2158	2494	6690,2	2368	2134
135	1512,3	2080,2	2175,8	2517,8	6733,6	2377,4	2152
139	1525,4	2097,8	2203,2	2545	6794,2	2395,2	2171,4
143	1538,2	2109,6	2220,6	2572	6854,8	2418,8	2187,2
146	1547,5	2117,4	2244	2589,8	6894,2	2434,2	2201,2
150	1559,7	2136,6	2267,4	2617	6948,8	2450	2224,6
154	1571,5	2148,6	2289	2640,4	7007,8	2473,4	2246,2
158	1583,0	2166,2	2316,6	2665,6	7054,4	2489	2259,8
162	1594,3	2178	2336	2687,4	7113,2	2514,8	2277,6
166	1605,3	2188	2361,2	2714,6	7162,2	2532	2301,4
171	1618,6	2205,2	2386,6	2740	7220,8	2559,4	2322,8
175	1629,0	2220,8	2406	2767,4	7267,8	2580,8	2338,6
180	1641,7	2231	2437,2	2790,6	7330,6	2618	2352

184	1651,6	2246,6	2447,4	2812	7375,6	2633,6	2365,8
189	1663,7	2262	2478,2	2841,4	7428,4	2664,8	2383,6
194	1675,4	2273,8	2503,6	2864,8	7483,2	2692,2	2409,4
199	1686,9	2287,6	2530,8	2890	7532	2707,6	2426,8
204	1698,0	2305,2	2550,8	2909,8	7578,8	2735,4	2444,8
210	1711,1	2320,6	2577,6	2947	7641,6	2768,6	2468
215	1721,7	2334,4	2601	2970	7688,8	2792	2487,8
221	1734,1	2352,2	2628,6	2997,6	7747,4	2821,4	2513,4
226	1744,1	2363,8	2647,6	3016,8	7794,4	2835	2532,8
232	1755,9	2379,4	2679	3046	7845,6	2880	2557
238	1767,4	2395	2701	3073,6	7898,6	2909,4	2578
244	1778,6	2408,8	2721,8	3095	7947,6	2939	2603,8
251	1791,3	2426,2	2755,2	3128	8004,8	2978,2	2631,2
257	1802,0	2436,2	2776,4	3147,8	8048,2	3007,4	2651
264	1814,1	2455,8	2800	3178,8	8107,2	3032,8	2674,4
271	1825,8	2467,4	2825,6	3204,2	8162,4	3060,2	2698
278	1837,3	2486,8	2850,8	3227,6	8205,6	3091,6	2713,8
285	1848,5	2504,6	2879,8	3252,8	8258,6	3117,2	2735,6
292	1859,4	2518,4	2901,4	3276,4	8300	3142,6	2763
300	1871,6	2534	2932,8	3301,6	8353,2	3174,2	2778,4
308	1883,4	2551,6	2956	3334,8	8406,4	3207,2	2806
316	1895,0	2555,8	2981,4	3358	8453,8	3230,6	2827,8
324	1906,2	2575,2	3010,6	3377,4	8497	3260,2	2849,2
332	1917,2	2587	3034,2	3405	8542,4	3279,8	2874,8
341	1929,2	2604,4	3059,6	3420,4	8595,6	3311,2	2906,4
350	1240,9	2620	3086,8	3449,4	8640,6	3340,4	2928
359	1252,4	2634	3112,2	3477	8682	3364	2955,6
368	1263,5	2651,6	3137,6	3496,6	8725,4	3389,6	2979,2
378	1275,6	2667,2	3170,6	3520,2	8768,6	3420,8	3002,8
388	1287,3	2669,2	3188,2	3541,4	8814	3450	3026,2
398	1298,8	2682,8	3215,6	3566,6	8857,2	3477,8	3053,8
408	1310,0	2698,6	3248,6	3588,2	8896,8	3497,4	3071,6
419	1321,9	2712,2	3266,2	3615,8	8938,2	3526,6	3095,2
429	1332,5	2729,8	3295,4	3634,8	8971,4	3554	3114,8
441	1345,0	2743,8	3322,6	3656,6	9018,6	3583,4	3132,4
452	1356,0	2747,4	3346	3672	9068	3606,8	3158,2
464	1367,8	2765,4	3375,4	3709,2	9119,4	3634,4	3177,8
476	1379,3	2773,4	3395	3736,4	9176,4	3654	3195,8
488	1390,5	2787	3424	3765,8	9220	3687	3217,2
501	1402,4	2798,8	3443,6	3793,2	9273	3709	3235
514	1413,9	2820,2	3474,4	3816,4	9318,6	3740	3250,8
527	1425,1	2839,6	3488	3849,6	9356,4	3759,4	3279,8
541	1436,9	2865,2	3521,2	3867,4	9395,6	3781,2	3301,8
555	1448,4	2886,8	3538,6	3894,4	9433,4	3800,6	3327,2
569	1459,6	2896,4	3559,8	3921,8	9465	3822,2	3356,8
584	1471,3	2912,2	3581,2	3950,8	9502,6	3839,6	3374,4
599	1482,7	2931,6	3600,8	3987,8	9533,8	3859,4	3397,8
615	1494,6	2951	3620,2	4007,4	9571,2	3874,8	3423,4
630	1505,5	2962,6	3643,2	4040,6	9614,8	3894,4	3447,2
647	1517,4	2974,2	3656,6	4060,4	9663,8	3900,2	3480,4
664	1529,1	2982,2	3681,8	4089,2	9697,2	3919,8	3506

681	1540,5	2996	3713,2	4108,6	9736,2	3931,6	3533,4
698	1551,6	2994	3740,6	4126,4	9779,2	3953,2	3557
717	1563,7	3009,4	3771,8	4155,4	9838,4	3978,6	3580,6
735	1574,8	3019,2	3795,2	4182,4	9899,4	3998,2	3604,2
754	1586,3	3038,8	3822,6	4209,8	9956,6	4029,6	3629,6
774	1598,1	3054	3842	4237,2	10008,2	4068,6	3653,2
794	1609,6	3073,6	3861,6	4264,6	10057,4	4113,4	3670,8
814	1620,8	3105	3893	4299,6	10098,6	4143	3692,6
836	1632,8	3134,4	3920,6	4331	10147,6	4168,2	3716
857	1643,9	3158	3944	4358,4	10202,6	4197,6	3733,8
879	1655,3	3187,4	3967,6	4383,6	10249,8	4225,2	3755,2
902	1667,0	3205,2	3998,6	4412,8	10307,2	4252,4	3774,8
926	1678,8	3228,8	4041,6	4451,8	10358,6	4281,8	3808
950	1690,3	3246,6	4072,8	4491,2	10409,4	4301	3829,6
974	1701,5	3275,6	4106	4520,4	10452,8	4326,8	3853,2
1000	1713,4	3301,2	4135	4563,4	10500,2	4340,2	3878,8
1025	1724,5	3314,8	4162,6	4596,6	10545,4	4361,6	3894,4
1052	1736,2	3344,8	4192,2	4627,6	10598,4	4383,2	3914,2
1079	1747,6	3362	4225,2	4661,2	10646	4398,8	3933,6
1107	1759,1	3381,6	4256,6	4698	10695,4	4420,2	3961
1136	1770,8	3409,4	4287,8	4725,6	10741	4436	3988,6
1165	1782,1	3429	4309,4	4758,8	10784	4471,2	4008
1196	1793,9	3446,8	4339	4788	10837,6	4496,6	4030
1227	1805,4	3473,8	4371,6	4811,4	10873,2	4531,6	4043,6
1258	1816,7	3497,6	4397,4	4838,8	10916,6	4562,6	4063,2
1291	1828,3	3511,4	4425	4866,2	10956	4590,2	4087
1325	1840,0	3532,6	4459,8	4889,6	10993,6	4619,4	4110,2
1359	1851,4	3550,4	4493,2	4913	11031	4646,8	4127,8
1394	1862,8	3564,4	4512,6	4940,6	11072,6	4677,6	4143,8
1430	1874,3	3576,2	4540,2	4970	11120,2	4695,4	4168,8
1467	1885,8	3594,2	4567,4	4995	11152,2	4721	4192,8
1505	1897,3	3623,4	4586,8	5013	11175,4	4744,4	4208,2
1544	1908,8	3647	4606,4	5044	11212,8	4757,8	4232
1584	1920,3	3660,8	4626	5063,6	11250	4767,8	4263,2
1625	1931,8	3668,6	4639,4	5079,2	11274	4787,2	4282,8
1668	1943,6	3674,2	4668,8	5094,8	11331,2	4806,8	4306,4
1711	1955,1	3684	4686,4	5124	11392,2	4822,4	4327,8
1755	1966,5	3696	4708	5161,4	11435,8	4855,6	4343,6
1801	1978,1	3740,8	4737,4	5186,6	11471	4890,4	4357
1847	1989,5	3762,6	4764,8	5209,8	11516,6	4920	4382,8
1895	2001,0	3794,4	4800	5251,4	11559,8	4939,4	4404,2
1944	2012,5	3813,8	4829,4	5276,6	11609,2	4958,8	4423,6
1995	2024,2	3829,2	4856,6	5313,8	11653	4978,2	4437,4
2046	2035,5	3853	4882	5337,2	11694,4	4990	4461,2
2100	2047,2	3876,6	4907,4	5366,4	11733,6	5007,6	4482,6
2154	2058,7	3900,2	4938,8	5385,8	11775	5042,6	4500,4
2210	2070,2	3927,8	4970	5415,4	11810,4	5075,8	4510
2267	2081,7	3941,4	4993,4	5433	11851,8	5103	4531,6
2326	2093,2	3963,2	5017,2	5462,2	11885,4	5122,6	4553,2
2386	2104,7	3977,2	5042,4	5487,8	11918,8	5144,4	4570,6
2448	2116,2	3989	5073,4	5507,4	11947,8	5159,6	4586,4

2511	2127,7	4022,4	5093	5530,8	11981,4	5175,6	4615,8
2576	2139,2	4032,2	5096,8	5538,8	12013,4	5201	4631,4
2643	2150,7	4026,2	5110,2	5554,6	12064,2	5212,6	4647,4
2712	2162,3	4042	5136	5583,4	12105,6	5226,2	4670,6
2782	2173,8	4079,6	5161,6	5613	12145	5267,2	4684,4
2854	2185,3	4101	5194,6	5649,8	12178,6	5290,8	4698,2
2928	2196,8	4124,6	5216,2	5673,4	12222	5300,6	4721,6
3004	2208,3	4146,6	5237,8	5700,8	12267,2	5321,8	4743,2
3082	2219,9	4170	5271,2	5722,4	12302,4	5337,6	4756,8
3162	2231,4	4192	5294,6	5742	12333,8	5367	4763
3244	2242,9	4209,6	5321,6	5761,4	12371	5392,4	4786,4
3328	2254,4	4229,4	5343,4	5782,8	12392,6	5410	4804
3414	2265,9	4231,4	5361,2	5812,4	12431,8	5431,2	4823,4
3503	2277,5	4264,8	5380,6	5818,2	12463,6	5460,8	4841,4
3593	2288,9	4266,8	5386,4	5837,8	12493	5464,6	4860,8
3686	2300,4	4276,6	5411,8	5863,2	12544,2	5478,2	4862,8
3782	2312,0	4306,2	5441	5894,2	12579,6	5507,8	4886,2
3880	2323,5	4333,6	5468,4	5917,6	12611,2	5527,2	4899,6
3981	2335,1	4355,4	5492	5941,2	12652,4	5535	4919,4
4084	2346,6	4375	5517,4	5964,4	12681,6	5566,4	4925,4
4190	2358,1	4392,8	5544,8	5984	12709,2	5583,8	4946,8
4298	2369,5	4406,8	5558,6	5997,8	12744,4	5603,2	4962,6
4410	2381,1	4420,6	5572,4	6019	12772,2	5622,8	4984
4524	2392,6	4432,2	5576,4	6036,6	12798	5642,4	4992
4641	2404,1	4440	5605,6	6060,2	12848,6	5648,4	5005,6
4761	2415,6	4470	5633	6087,6	12885,8	5679,8	5027
4885	2427,1	4493,2	5652,4	6111	12911,4	5691,4	5046,8
5011	2438,6	4515	5678	6136,4	12944,4	5709	5046,8
5141	2450,1	4536,8	5695,6	6149,8	12961,4	5732,6	5068,4
5274	2461,6	4544,6	5721,2	6171,6	13005,2	5749,8	5087,8
5411	2473,2	4564,4	5732,8	6191,2	13025,2	5777,4	5105,4
5551	2484,7	4565,8	5734,8	6199,2	13068,2	5783,4	5107,4
5695	2496,2	4595,8	5772	6232	13107,8	5806,6	5130,8
5843	2507,7	4615,6	5793,6	6259,4	13137,2	5816,6	5144,6
5994	2519,2	4639,2	5811,2	6271	13150,4	5840,2	5154,2
6150	2530,8	4655	5832,6	6290,8	13201,4	5853,6	5172
6309	2542,3	4664,8	5844,4	6306,2	13227,6	5879,2	5187,8
6473	2553,8	4676,4	5852,2	6320	13259,2	5894,8	5197,4
6640	2565,3	4696,2	5879,6	6353,2	13296,4	5900,6	5218,8
6812	2576,8	4716,2	5901,4	6371,2	13333,6	5920,2	5232,4
6989	2588,3	4735,8	5927	6398,2	13352,8	5943,6	5248,2
7170	2599,8	4753,6	5938,6	6413,8	13388,6	5963,2	5267,8
7356	2611,4	4763,2	5940,6	6425,8	13416,4	5978,8	5277,4
7547	2622,9	4779	5968	6451,2	13451,6	5994,6	5292,8
7742	2634,4	4799,2	5990	6470,8	13476,8	6008,2	5304,8
7943	2645,9	4814,4	6009,2	6496,4	13518,4	6024	5318,6
8149	2657,4	4826,8	6028,8	6505,8	13549,6	6043,6	5337,8
8360	2668,9	4844,4	6021	6525,4	13577,6	6064,8	5347,8
8576	2680,4	4866,2	6054,4	6552,6	13613	6070,8	5361,6
8799	2692,0	4882	6074,2	6566,8	13646,2	6090,4	5369,4
9027	2703,5	4903,6	6095,6	6588,2	13683,6	6108,2	5385

9261	2715,0	4911,6	6097,8	6607,4	13707,8	6131,6	5408,4
9501	2726,5	4931,2	6125,2	6629,2	13736,6	6135,6	5422,2
9747	2738,0	4943,4	6144,6	6654,6	13768,4	6155	5418,4
10000	2749,5	4962,8	6156,4	6668,2	13813,4	6170,6	5447,6
10259	2761,0	4968,8	6156,4	6686	13828	6186,2	5465,2
10525	2772,6	5000,2	6189,8	6709,4	13867,2	6196	5482,8
10797	2784,0	5012	6209,6	6724,8	13912,2	6212	5490,8
11077	2795,6	5022	6215,6	6744,6	13940	6245	5504,4
11364	2807,1	5035,6	6237	6764	13971,4	6250,8	5516
11659	2818,6	5051,8	6254,8	6793,4	14016,8	6256,8	5539,2
11961	2830,1	5071,6	6268,4	6805,4	14052,4	6278,2	5551,2
12271	2841,6	5087	6286	6826,8	14078,4	6301,6	5567
12589	2853,1	5101	6297,8	6852,4	14118,2	6301,6	5578,8
12915	2864,6	5119	6317,6	6859,8	14152	6327,2	5590,2
13250	2876,2	5126,4	6325,6	6883,4	14177,4	6346,6	5608
13593	2887,7	5144,4	6345	6907	14221	6359,2	5623,6
13945	2899,2	5164,2	6360,8	6928,4	14256,4	6396,8	5629,4
14307	2910,7	5172,2	6374,2	6944,2	14290,8	6364,6	5641
14677	2922,2	5189,8	6390	6961,8	14328,4	6424,2	5668,6
15058	2933,7	5205,6	6396	6985,2	14356,2	6411,6	5678,4
15448	2945,2	5231,2	6421,4	7008,8	14403,8	6439,6	5696
15848	2956,7	5243,2	6433,2	7026,4	14437,2	6438,4	5707,8
16259	2968,3	5248,8	6445	7038,2	14469,2	6450,2	5721,4
16681	2979,8	5270,6	6464,6	7055,6	14508,6	6473,8	5733
17113	2991,3	5282,4	6478,2	7077,4	14549	6493,4	5741,2
17556	3002,8	5308,2	6492	7096,8	14578,4	6511	5762,6
18011	3014,3	5312,4	6499,8	7118,6	14624,6	6534,6	5770,2
18478	3025,8	5336	6521,8	7132,2	14660	6544,2	5791,8
18957	3037,3	5348	6531,6	7157,6	14690,2	6572	5797,6
19448	3048,9	5373,4	6552,8	7167,4	14740	6581,6	5817,2
19952	3060,4	5375,4	6560,8	7187	14764,6	6603,2	5836,6
20469	3071,9	5399	6582,6	7208,6	14815,6	6617	5850,6
21000	3083,4	5411,2	6596,2	7232,2	14851,4	6644,6	5867,8
21544	3094,9	5426,8	6604,2	7236	14895	6654,2	5883,6
22102	3106,4	5434,6	6617,8	7245,8	14927,2	6670	5893,2
22675	3117,9	5450,6	6631,2	7279	14973,2	6699,2	5901
23263	3129,5	5480	6651	7287	15007,2	6715	5918,6
23865	3141,0	5486	6664,8	7310,4	15041,2	6736,6	5934,2
24484	3152,5	5510	6673	7336	15090,6	6754,2	5942,2
25118	3164,0	5525,4	6688,4	7343,8	15118,4	6762,2	5955,8
25769	3175,5	5543,4	6708	7361,2	15166,6	6787,6	5975,4
26437	3187,0	5555	6714	7384,8	15206,2	6809,2	5990,8
27122	3198,5	5567	6727,8	7390,8	15254,4	6815,2	6006,4
27825	3210,0	5583	6743,4	7410,2	15284,4	6842,8	6026
28546	3221,6	5592,8	6751,2	7426	15333,4	6864,2	6031,8
29286	3233,1	5614,4	6768,8	7447,6	15373,2	6878	6051,2
30045	3244,6	5634,2	6772,8	7467,4	15407,2	6891,6	6065
30823	3256,1	5642	6794,4	7482,8	15449	6915,2	6078,8
31622	3267,6	5656	6804,2	7488,4	15491	6924,8	6096,4
32442	3279,1	5677,4	6806,2	7506,4	15532,4	6944,8	6106,4
33282	3290,6	5687,4	6823,8	7521,8	15578,2	6968,4	6117,8

34145	3302,1	5711,2	6833,6	7543,8	15616	6978,4	6133,6
35030	3313,7	5723,2	6845,6	7561,2	15645,8	7005,4	6153,2
35938	3325,2	5732,8	6859	7579	15687,2	7027,2	6167
36869	3336,7	5744,8	6861,4	7594,8	15716,8	7044,8	6180,4
37824	3348,2	5758,4	6868,8	7604,2	15761	7060,6	6190,4
38805	3359,7	5772,6	6890,8	7614	15796,8	7076,2	6208
39810	3371,2	5778	6892,4	7623,8	15814,2	7080,2	6219,6
40842	3382,7	5796,2	6902,2	7626	15847,8	7113,6	6235,6
41900	3394,2	5804	6906,4	7653,8	15879,6	7143	6251,2
42986	3405,8	5810	6921,8	7669,2	15911,4	7154,8	6254,8
44100	3417,3	5821,8	6916,2	7675,2	15943,6	7178,4	6266,8
45243	3428,8	5831,8	6925,8	7685,2	15954,8	7203,8	6270,8
46415	3440,3	5847,6	6933,8	7683	15986,6	7217,6	6294,4
47618	3451,8	5847,6	6953,2	7706,8	16008,2	7233,4	6308
48852	3463,3	5863,2	6949,2	7710,6	16028	7256,8	6304,4
50118	3474,8	5875	6959,2	7704,8	16049,8	7276,4	6313,8
51417	3486,4	5884,8	6965	7736,6	16063,2	7284,2	6331,4
52749	3497,9	5879,2	6975	7740,6	16083,4	7309,8	6335,2
54116	3509,4	5894,8	6975	7742,4	16094,8	7325,6	6341,2
55519	3520,9	5901	6996,6	7756,2	16108,8	7343,2	6350,8
56958	3532,4	5914,8	6998,6	7758,2	16126,8	7360,8	6356,8
58434	3543,9	5914,6	7010,4	7760,2	16138,4	7382,4	6368,8
59948	3555,4	5926,8	7014,4	7769,8	16152,2	7401,8	6376,4
61501	3566,9	5934,6	7029,8	7765,8	16156	7431,4	6378,4
63095	3578,5	5938,6	7037,6	7779,8	16172	7421,6	6384,4
64730	3590,0	5939	7033,8	7789,6	16182	7447,2	6390,2
66408	3601,5	5940,6	7051,6	7793,6	16185,6	7460,8	6399,6
68129	3613,0	5960,2	7053,4	7801,4	16201,2	7474,6	6407,6
69894	3624,5	5950,4	7057,2	7801,6	16209	7490,4	6415,6
71706	3636,0	5958	7065	7809,4	16227	7502,4	6419,6
73564	3647,5	5956	7069	7823	16235,2	7514,4	6419,6
75470	3659,1	5964,2	7070,8	7827,2	16241	7526,2	6431,4
77426	3670,6	5978,4	7071	7831	16264,2	7577,6	6435,2

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 16.06.1968
 Doğum Yeri : Sivas
 İlkokul : Gaziosman Paşa İlkokulu, Sivas, 1979.
 Ortaokul : Danişment Gazi Ortaokulu, Sivas, 1982.
 Lise : Sivas Lisesi, Sivas, 1985.
 Lisans : Yıldız Üniversitesi, İstanbul, 1990
 Yüksek Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993.

Yaptığı Görevler

- 1991 - 1993 : İnşaat Mühendisi
3K İnşaat Ltd. Şirketi
- 1993 – 1995 : Araştırma Görevlisi
Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- 1995 - 1996 : Araştırma Mühendisi
İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş. (İSFALT)
- 1996 - : Araştırma Görevlisi
Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi