

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON
DİRENCİNİN ÜÇ EKSENLİ KAYMA MUKAVEMETİ
DENEYİ İLE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Altan ÇETİN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2008

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON
DİRENCİNİN ÜÇ EKSENLİ KAYMA MUKAVEMETİ
DENEYİ İLE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Altan ÇETİN
(501992409)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Şubat 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Temmuz 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Emine AĞAR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Abdullah Hilmi LAV (İ.T.Ü.)
Yard.Doç.Dr. Şükriye İYİNAM (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. İlhan SÜTAŞ (Akdeniz Ü.)
Prof.Dr. Mustafa KARAŞAHİN (S.D.Ü.)**

TEMMUZ 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başarıya ulaşmasında, değerli bilgileriyle beni destekleyen ve beni cesaretlendiren danışman hocam saygıdeğer Prof. Dr. Emine AĞAR'a, en zor anlarımda sabır ve şefkat ile yaklaşarak, hayatımdaki çalışma azmimi sürdürme fırsatı verdiği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyer hayatına adım atmamda en büyük vesileler olan ve bu zorlu yolda yürüyebilmemde maddi ve manevi desteğini hiç eksik etmeyen, hocalarım Prof. Dr. Ahmet TUNCAN ve Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, bana haddimin fevkinde gösterdikleri ilgi ve alaka için minnettarım.

Tez izleme komitesinde yer alan, Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ ve Prof. Dr. Abdullah H. LAV'a çalışmaya olan katkıları ve samimi takdirleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Sevecen ve samimi tavırları ve göstermiş olduğu ilgiden dolayı Sayın Prof. Dr. Güven ÖZTAŞ hocamı saygı ve rahmetle anıyorum.

Deney sisteminin kurulmasında teknik açıdan destek olan atölye çalışanlarına ve deneyimlerinden yararlandığım KGM Araştırma Dairesi, Üstyapı Şubesi Laboratuvarı çalışanlarına samimi yaklaşımları ve yardımları için müteşekkirim.

Çalışmada kullanılan malzemelerin temininde yardımcı olan, Sn. Sebahattin HAN'a, Sn. A. Mürsel ALPTEKİN'e, Sn. Onur ÇETİNCEVİZE'e ve Sn. Ulaş BİLGİN'e şükranlarımı sunarım.

İhtiyaç duyduğum anlarda hep yanımda olan, hakkını ödeyemeyeceğim arkadaşım Muhsin YALÇIN'a ve yardımlarını esirgemeyen Araş.Gör. Sabit KUTLUHAN ve Araş.Gör. Mustafa TANIŞ'a ve bu çalışmada emeği geçen, ismini burada zikredemediğim herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her safhasında en büyük desteğim olan sevgili aileme ödenmesi imkansız bir vefa borcunun naçizane ifadesi olarak şükranlarımı sunuyorum.

Temmuz 2008

Altan ÇETİN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Konusu ve Kapsamı	4
1.2. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi	5
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN TASARIMI	6
2.1. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımında Kullanılan Mekanik Deneyler	6
2.2. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri	10
2.2.1. Reçete tasarım yöntemleri (Standart karışım şartnameleri)	10
2.2.2. Ampirik tasarım yöntemleri (Marshall deneyi)	13
2.2.3. Analitik tasarım yöntemleri	14
2.2.4. Hacimsel tasarım yöntemleri	15
2.2.5. Performans ilişkili tasarım yöntemleri	17
2.2.6. Performans esaslı tasarım yöntemleri	18
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞI	22
3.1. Mekanik ve Reolojik Malzeme Modelleri	26
3.1.1. Elastik malzeme davranışı	26
3.1.2. Viskoz malzeme davranışı	27
3.1.3. Lineer visko-elastik malzeme davranışı	28
3.1.3.1. Sünme ve rölaksasyon modülü	30
3.1.3.2. Esneklik modülü (Resilient modulus)	31
3.1.4. Plastik, elasto-plastik ve visko-plastik malzeme davranışı	31
3.2. Bitümlü Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar	35
3.3. Kalıcı Deformasyonlar	37
3.3.1. Kalıcı deformasyon oluşum mekanizması	37
3.3.2. Kalıcı deformasyon direncini etkileyen faktörler	40
3.3.2.1. Agrega özellikleri	40
3.3.2.2. Bitümlü bağlayıcı özellikleri	46
3.3.2.3. Karışım özellikleri	50
3.3.2.4. Çevre ve trafik koşulları	51

3.3.3. Kalıcı deformasyonun tahmininde kullanılan deneyler	52
3.3.3.1. Temel deneyler	52
3.3.3.2. Ampirik deneyler	57
3.3.3.3. Benzetim deneyleri	57
3.3.4. Kalıcı deformasyon tahmin modelleri	59
4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞININ ÜÇ EKSENLİ KAYMA PARAMETRELERİ İLE NİTELENDİRİLMESİ	67
4.1. Üç Eksenli Karışım Tasarım Yöntemi	69
4.2. Bitümlü Karışımlarda Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Uygulamaları	77
4.3. Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Kuramsal Yaklaşımlar	88
4.3.1. Kırılma kuramı	89
4.3.2. Mohr-Coulomb kırılma kuramı	90
4.3.3. Dracker-Prager kırılma kuramı	96
4.3.4. Oktahedral kayma gerilmesi kuramı	96
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	99
5.1. Deneysel Çalışma Programı	99
5.2. Kullanılan Malzemeler	100
5.2.1. Agregası	100
5.2.2. Bitümlü bağlayıcı	103
5.2.3. Bitümlü selülozik fiber	104
5.3. Kullanılan Deney Düzenekleri ve Yöntemleri	105
5.3.1. Marshall deneyi	105
5.3.2. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi	106
5.3.2.1. Çift taraflı statik sıkıştırma aleti ve numune hazırlama yöntemi	106
5.3.2.2. Üç eksenli kayma mukavemeti deney düzeneği	109
5.3.2.3. Üç eksenli kayma mukavemeti deney yöntemi	111
5.3.3. Tek eksenli tekrarlı sünme deneyi	112
5.3.3.1. Tek eksenli tekrarlı sünme deney düzeneği	112
5.3.3.2. Tek eksenli tekrarlı sünme deney yöntemi	113
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	114
6.1. Marshall Deneyi Sonuçları	115
6.2. Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Sonuçları	118
6.2.1. Agregası tane dağılımı ve bitüm yüzdesinin karışımın deformasyon direncine etkisi	120
6.2.2. Bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerinin karışımın deformasyon direncine etkisi	125
6.2.3. Kayma parametreleri ve oktahedral kayma gerilmelerinin belirlenmesi	128

6.3. Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Sonuçları	134
6.3.1. Agrega tane dağılımı ve bitüm yüzdesinin karışımın deformasyon direncine etkisi	134
6.3.2. Bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerinin karışımın deformasyon direncine etkisi	139
6.4. Kalıcı Deformasyon Tahmin Modelinin Geliştirilmesi	141
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	150
EKLER	159
ÖZGEÇMİŞ	191

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transp. Officials
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AFNOR	: Association Française pour la Normalization
ALF	: Accelerated Loading Facility
ANAS	: Italian National Road Authority
ANOVA	: Analysis of Variance
APA	: Asphalt Pavement Analyzer
APT	: Asphalt Pavement Tester
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASTO	: Finnish Initials for Asphalt Pavement Research Program
AUTOSTRADE	: The Main Highway System in Italy
AYMA	: Ayres Materials Analysis
BS	: British Standarts
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışımlar
CEN	: European Committee for Standardization
CNR	: Italian National Research Council
CROW	: Centre for Research and Contract Standardization in Civil and Traffic Engineering
CRR	: Recommendation of Belgian Road Research Center
DIN	: Deutsches Institut für Normung
DSR	: Dynamic Shear Rheometer
EN	: European Norms
ESAL	: Equivalent Standart Axle Loads
GI	: Gradation Index
GLPA	: Gyrotory Load Cell Plate Assembly
GTM	: Gyrotory Testing Machine
ICT	: Intensive Compactor Tester
INDOT	: Indiana Department of Transportation
IPC	: Industrial Process Controls
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğünü
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LPI	: Lateral Pressure Indicator
LVDT	: Linear Variable Differential Transducers
MATTA	: Materials Testing Apparatus
NARC	: National Asphalt Research Committee
NAT	: Nottingham Asphalt Tester
NCAT	: National Center for Asphalt Technology
NCHRP	: National Center for Highway Research Program
PCG	: Presse á Cisaillement Giratoire
PI	: Penetration Index
PMA	: Polimer Modifiye Bitüm
PURWeel	: Purdue Laboratory Wheel Track Device

RAW	: Roads Asphalt Wearing
RSST-CH	: Repeated Shear at Constant Height Test
SBS	: Styrene-Butadiene-Styrene
SGC	: Superpave Gyrotory Compactor
SHRP	: Strategic Highway Research Program
SMA	: Stone Mastic Asphalt
SN	: Swedish Norms
SST	: Superpave Shear Tester
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavements
TMA	: Taş Mastik Asphalt
TS	: Türk Standartları
TTS	: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme
UTM	: Universal Testing Machine
ÜKM	: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti
VMA	: Voids of Mineral Aggregate
ZSV	: Zero-Shear Viscosity

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Karışım tasarım yöntemleri, ölçütleri ve kategoriler [15]	11
Tablo 3.1 : Hook kanunu ve lineer-elastik model	26
Tablo 3.2 : Newton kanunu ve lineer-viskoz model	28
Tablo 3.3 : Maxwell modeli (Lineer visko-elastik model).....	29
Tablo 3.4 : Kelvin modeli (Lineer visko-elastik model).....	29
Tablo 3.5 : Burger modeli (Lineer visko-elastik model).....	30
Tablo 3.6 : Saint-Venant cismi (Rijit, tam plastik model)	32
Tablo 3.7 : Lineer elastik, tam plastik model	32
Tablo 3.8 : Bingham cismi (Lineer visko-plastik model)	32
Tablo 3.9 : Kalıcı deformasyon direncini etkileyen parametreler.....	40
Tablo 3.10 : Çapsal deneylerin üstünlük ve eksiklikleri [53]	53
Tablo 3.11 : Tek eksenli deneylerin üstünlük ve eksiklikleri [53].....	54
Tablo 3.12 : Üç eksenli deneylerin üstünlük ve eksiklikleri [53]	55
Tablo 3.13 : Kayma deneylerinin üstünlük ve eksiklikleri [53].....	56
Tablo 3.14 : Ampirik deneylerin üstünlük ve eksiklikleri [53].....	58
Tablo 3.15 : Benzetim deneylerinin üstünlük ve eksiklikleri [53].....	59
Tablo 5.1 : Kullanılan kaba agreganın (bazalt) özellikleri.....	101
Tablo 5.2 : Agregalara ait özgül ağırlık ve su emme değerleri (TS 3526).....	101
Tablo 5.3 : Seçilen agrega tane dağılımları ve şartname limitleri.....	102
Tablo 5.4 : Kullanılan bitümlü bağlayıcılara ait özellikler	104
Tablo 5.5 : Kullanılan bitümlü bağlayıcılara ait penetrasyon indeks değerleri	104
Tablo 5.6 : Bitümlü selülozik fiberin görünümü ve fiziksel özellikleri [9]	105
Tablo 6.1 : Deney numunelerinin tanımlanmasında kullanılan kodlama sistemi	114
Tablo 6.2 : Aşınma Tip-1 için Marshall tasarım sonuçları.....	116
Tablo 6.3 : TMA Tip-1 için Marshall tasarım sonuçları	116
Tablo 6.4 : TMA Tip-2 için Marshall tasarım sonuçları	116
Tablo 6.5 : Kohezyon-içsel sürtünme açısı ve oktahedral kayma gerilme değerleri	133
Tablo 6.6 : Aşınma Tip-1 için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin korelasyon matrisi.....	142
Tablo 6.7 : Aşınma Tip-1 için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin anlamlılık düzeyi.....	143
Tablo 6.8 : Aşınma Tip-1 için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin katsayıları.....	143
Tablo 6.9 : TMA karışımlar için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin korelasyon matrisi.....	145
Tablo 6.10 : TMA karışımlar için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin anlamlılık düzeyi.....	145
Tablo 6.11 : TMA karışımların kalıcı deformasyon modelinin katsayıları	145

Tablo A.1 : TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 için Schellenberger bitüm süzülme deneyi.....	160
Tablo B.1 : ÜKM deney verilerinden deviatör gerilmelerin hesaplanması	161
Tablo C.1 : Aşınma Tip-1 için Marshall sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım sonuçları	166
Tablo C.2 : Aşınma Tip-1 için statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım sonuçları	169
Tablo C.3 : TMA Tip-1 için Marshall sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım sonuçları	171
Tablo C.4 : TMA Tip-1 için statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım sonuçları	173
Tablo C.5 : TMA Tip-2 için statik sıkıştırma ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım sonuçları	174
Tablo D.1 : ÜKM deney numunelerinin hacimsel özellikleri.....	177
Tablo E.1 : Tek eksenli tekrarlı sünme deneyi numunelerinin hacimsel özellikleri	182

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Birim kaplama elemanı üzerinde oluşan gerilmeler [16].....	8
Şekil 2.2	: Taşıt tekerleğinin hareketi ile birim kaplama elemanının asal gerilme ekseninin yön değiştirmesi [17].....	9
Şekil 2.3	: Taşıt tekerleğinin hareketi ile gerilmelerde oluşan değişimler [11].....	9
Şekil 2.4	: Superpave karışım tasarım yöntemi akış diyagramı [15]	20
Şekil 3.1	: Tekerlek yükü altında üstyapı yüzeyinin deformasyonu [13]	23
Şekil 3.2	: Tekerlek yükünün kaplama tabakasında oluşturduğu gerilmeler	23
Şekil 3.3	: Tipik bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi	24
Şekil 3.4	: Tekrarlı yüklemeye oluşan şekil değiştirme bileşenleri [24].....	25
Şekil 3.5	: Tresca kırılma zarfı	33
Şekil 3.6	: Mohr-Coulomb kırılma zarfı	34
Şekil 3.7	: Tekerlek izi oluşumunu gösteren fotoğraflar	35
Şekil 3.8	: Kaplamada Oluşan Çatlak Türleri: (a)Yorulma Çatlakları (b) Düşük Sıcaklık Çatlağı.....	36
Şekil 3.9	: Düşük taşıma kapasiteli taban zeminine bağlı tekerlek izi oluşumu	38
Şekil 3.10	: Zayıf bitümlü kaplama tabakasına bağlı tekerlek izi oluşumu [1].....	38
Şekil 3.11	: Hareketli tekerlek yükü altında oluşan visko-elastik davranış	39
Şekil 3.12	: Agreganın karışımın kayma mukavemetine katkısı [1].....	41
Şekil 3.13	: Birinci durum için çizilen maksimum yoğunluk eğrisi [34].....	43
Şekil 3.14	: İkinci durum için çizilen maksimum yoğunluk eğrisi [34].....	43
Şekil 3.15	: Bitümlü bağlayıcının karışımın kayma mukavemetine katkısı [1].....	46
Şekil 3.16	: Üç safhalı kalıcı deformasyon eğrisi-lineer [69]	66
Şekil 3.17	: Üç safhalı toplam kalıcı deformasyon eğrisi-logaritmik [69]	66
Şekil 4.1	: Yarı-sonsuz cisim üzerindeki düzgün yayılı dairesel yüke bağlı oluşan en büyük gerilmeler [70]	70
Şekil 4.2	: Mohr diyagramı üzerinde gerilme analizi [70].....	70
Şekil 4.3	: Düzgün yayılı dairesel yük altındaki malzemenin kohezyon değerinin belirlendiği grafik [70]	71
Şekil 4.4	: Farklı içsel sürtünme açılarında yüzeydeki aşırı gerilmeyi önlemek için gerekli kohezyon değerleri [70].....	72
Şekil 4.5	: Farklı dayanım kapasitelerindeki üç eksenli kayma parametreleri.....	73
Şekil 4.6	: Bitümlü karışımlar için değerlendirme abağı [70].....	74
Şekil 4.7	: Farklı trafik koşulları için değerlendirme abağı [70].....	74
Şekil 4.8	: Kapalı-sistem üç eksenli basınç deneyi sonuç eğrisi [70]	76
Şekil 4.9	: Bitümlü karışımlar üzerinde gerçekleştirilen açık ve kapalı üç eksenli deney sonuçlarının karşılaştırılması [73].....	79
Şekil 4.10	: Bitüm içeriğinin bir fonksiyonu olarak gerilme özellikleri [73].....	79
Şekil 4.11	: Bitümlü karışımların üç eksenli kayma parametrelerinin yüklenme hızı ile değişimi: (a) Stabilitate (b) İçsel Sürtünme açısı ve kohezyon [78]	81

Şekil 4.12 : Farklı sıkıştırma basınçları için (a) %1 şekil değiştirmedeki gerilme ve (b) Birim hacim ağırlık değerlerinin bitüm yüzdesi ile değişimi [80]	82
Şekil 4.13 : Çift taraflı statik sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan 200 mm yükseklikli numunelerin yoğunluk profili [83].....	83
Şekil 4.14 : Üç eksenli kayma mukavemeti deney sistemi [10, 12, 81, 82]	84
Şekil 4.15 : Kohezyon ile serbest basınç mukavemetinin korelasyonu [88].....	88
Şekil 4.16 : Malzemenin birim kesitindeki gerilme denge diyagramı [70].....	91
Şekil 4.17 : Farklı yanal basınçlar için Mohr dairelerinin çizimi [70].....	91
Şekil 4.18 : c ve ϕ parametrelerinin belirlendiği Mohr-Coulomb grafiği	93
Şekil 4.19 : Mohr-Coulomb kırılma kuramı	94
Şekil 4.20 : Asal gerilme düzlemi	94
Şekil 5.1 : Karışımlarda kullanılan agrega tane dağılım eğrileri	102
Şekil 5.2 : Seçilen agrega tane dağılımlarının 0,45'inci kuvvet grafiği ve tane dağılım indeks değerleri.....	103
Şekil 5.3 : Yükseklik-çap oranının etkisi [87]	106
Şekil 5.4 : Çift taraflı statik sıkıştırma aleti: (a) Şeması (b) Fotoğrafı.....	107
Şekil 5.5 : Çift taraflı statik sıkıştırma yönteminde kullanılan numune kalıpları	108
Şekil 5.6 : Numune kesme aleti.....	109
Şekil 5.7 : Üç eksenli kayma mukavemeti deney sistemi: (a) Şeması (b) Fotoğrafı	110
Şekil 5.8 : Sıcaklık kontrollü basınç hücresi.....	110
Şekil 5.9 : Deney numunesinin üç eksenli basınç hücresine (a)Yerleştirilmesinde kullanılan malzemeler (b)Yerleştirilmiş hali ...	111
Şekil 5.10 : Tek eksenli tekrarlı sünme deneyinin gerçekleştirildiği (a) UTM-5 deney sistemi (b) Sünme donanımı	113
Şekil 6.1 : Karışım tiplerine ait numune kesitleri: (a) Aşınma Tip-1 (b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2	115
Şekil 6.2 : Karışım tiplerine ait tasarım birim hacim ağırlık değerleri	117
Şekil 6.3 : Farklı sıkıştırma yöntemleri kullanılarak yapılan Marshall tasarım sonuçları: (a) Optimum bitüm (b) Stabilite (c) Akma (d) VMA (e) Boşluk (f) Asfaltla dolu boşluk	118
Şekil 6.4 : Üç eksenli kayma mukavemeti deney numunelerin görünümü: (a) Deney öncesi ve (b) Deney sonrası	119
Şekil 6.5 : Değişik agrega tane dağılımı ve bitüm yüzdeleri için uygulanan üç eksenli kayma mukavemeti deney programı.....	120
Şekil 6.6 : Farklı bitüm yüzdelerindeki üç karışım tipine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) Aşınma Tip-1 (b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2.....	121
Şekil 6.7 : Farklı sıcaklıklardaki üç karışım tipine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) Aşınma Tip-1 (b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2.....	122
Şekil 6.8 : Üç karışım tipinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	124
Şekil 6.9 : Değişik reolojik özelliklere sahip bitüm türleri için uygulanan üç eksenli kayma mukavemeti deney programı	125
Şekil 6.10 : Üç farklı bitümlü bağlayıcı kullanılan Aşınma Tip-1 için farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) İzmit B 50-70 (b) Kırıkkale B 50-70 (c) Aliğa B 70-100.....	126

Şekil 6.11 : Üç farklı bitümlü bağlayıcı ve modifiye bitüm kullanılan TMA Tip-1 için farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) İzmit B 50-70 (b) Kırıkkale B 50-70 (c) Aliağa B 70-100 (d) Modifiye Bitüm	127
Şekil 6.12 : Aşınma Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	129
Şekil 6.13 : TMA Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	130
Şekil 6.14 : Karışım tiplerine ait optimum bitüm yüzdesindeki kohezyon değerlerinin sıcaklık ile değişimi	131
Şekil 6.15 : Aşınma Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcılara ait kohezyon değerlerinin sıcaklık ile değişimi	132
Şekil 6.16 : TMA Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcılara ait kohezyon değerlerinin sıcaklık ile değişimi	132
Şekil 6.17 : Aşınma Tip-1’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	135
Şekil 6.18 : TMA Tip-1’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	136
Şekil 6.19 : TMA Tip-2’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	137
Şekil 6.20 : Karışım tiplerine ait farklı sıcaklıklardaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	138
Şekil 6.21 : Aşınma Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıktaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	139
Şekil 6.22 : TMA Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıktaki toplam şekil değiştirme grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C	140
Şekil 6.23 : Kalıcı deformasyon tahmin modelinin parametreleri	142
Şekil 6.24 : Aşınma Tip-1 için geliştirilen regresyon tahmin modelinde standartlaştırılmış kalıntıların histogramı	144
Şekil 6.25 : Aşınma Tip-1 için gözlenen şekil değiştirme değerine karşılık regresyon tahmin modelinden elde edilen değerler (Log ϵ_p).....	144
Şekil 6.26 : TMA karışımlar için regresyon tahmin modelinin standartlaştırılmış kalıntıların histogramı	146
Şekil 6.27 : TMA karışımlar için gözlenen şekil değiştirme değerine karşılık regresyon tahmin modelinden elde edilen değerler (Log ϵ_p).....	146
Şekil B.1 : Gerilme-şekil değiştirme eğrileri	165
Şekil B.2 : Mohr daireleri ve kırılma zarfı.....	165
Şekil C.1 : Aşınma Tip-1 için Marshall sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım grafikleri: (a)Birim hacim ağırlık (b)Stabilite (c)Akma (d)Asfaltla dolu boşluk (e)Boşluk (f)VMA	168
Şekil C.2 : Aşınma Tip-1 için statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım grafikleri: (a)Birim hacim ağırlık (b)Stabilite (c)Akma (d)Asfaltla dolu boşluk (e)Boşluk (f)VMA	170

Şekil C.3	: TMA Tip-1 için Marshall sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım grafikleri: (a)Birim hacim ağırlık (b)Stabilite (c)Akma (d)Asfaltla dolu boşluk (e)Boşluk (f)VMA.....	172
Şekil C.4	: TMA Tip-1 için statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım grafikleri: (a)Birim hacim ağırlık (b)Stabilite (c)Akma (d)Asfaltla dolu boşluk (e)Boşluk (f)VMA.....	174
Şekil C.5	: TMA Tip-2 için statik sıkıştırma ile hazırlanan numunelere ait Marshall tasarım grafikleri: (a)Birim hacim ağırlık (b)Stabilite (c)Akma (d)Asfaltla dolu boşluk (e)Boşluk (f)VMA.....	176
Şekil F.1	: Aşınma Tip-1’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C.....	185
Şekil F.2	: TMA Tip-1’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C.....	186
Şekil F.3	: TMA Tip-2’de kullanılan bitüm yüzdelerinin farklı sıcaklıklardaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C.....	187
Şekil F.4	: Karışım tiplerine ait farklı sıcaklıklardaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C.....	188
Şekil F.5	: Aşınma Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıktaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C...	189
Şekil F.6	: TMA Tip-1’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıktaki sünme rijitliği grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C...	190

SEMBOL LİSTESİ

a, b, c, d, e ve f	: Tekrarlı yükleme deneyinden belirlenen malzeme sabitleri
B_{vis}	: Karışımda kullanılan bitümün kinematik viskozitesi
c	: Kohezyon
CA_{abs}	: Kaba agrega su absorpsiyon yüzdesi
C_m	: Laboratuardaki statik yüklerin arazideki dinamik yüklere dönüştürülmesinde kullanılan düzeltme faktörü
D_f	: Film kalınlığı
$D(t)$: Sünme uyumu
E, E_0	: Young modülü (Elastisite modülü)
$E_r(t)$: Rölaksasyon modülü
E_S	: Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı
F	: Kohezyon faktörü
F_S	: Güvenlik faktörü
G	: Kayma modülü
h	: Hesaplanan kalıcı deformasyon miktarı
H	: Bitümlü tabakanın kalınlığı
I_1	: Birinci gerilme sabiti
J_2	: İkinci deviatör gerilme sabiti
k	: Tresca sabiti
K	: Hacimsel modül
k'	: Drucker-Prager kohezyon parametresi
M_r	: Esneklik modülü (Resilient modulus)
N	: Yükleme tekrar sayısı
N_{maks}	: Maksimum sıkıştırma-dönme sayısı
N_{PS}	: İkincil safha başlangıcındaki yükleme tekrar sayısı
N_{ST}	: Üçüncül safha başlangıcındaki yükleme tekrar sayısı
N_{tas}	: Tasarım sıkıştırma-dönme sayısı
N_{ϕ}	: Yatay toprak basıncı katsayısı
P	: Dairesel alan üzerindeki birim düşey basınç
p_z	: Eksenel normal basınç
P_1	: Problemin olduğu noktadaki büyük asal gerilme
q_u	: Malzemenin tek eksenli basınç dayanımı
R_0	: Referans tekerlek izi derinliği
S	: Deviatör gerilme
S_G	: z derinliğindeki en büyük kayma gerilmesi
S_k	: Karışımın rijitlik modülü
S_{maks}	: Problemin olduğu noktadaki maksimum kayma gerilmesi
SP	: Yumuşama noktası
S_T	: Dolaylı çekme dayanımı
$S(t)$: Sünme rijitliği
t, t_0	: Zaman
T	: Kaplama veya deney sıcaklığı

T_0, N_0	: R_0 'daki referans sıcaklık ve yükleme tekrar sayısı
TD	: Tekerlek izi derinliği
V_{bef}	: Hacimce efektif bitüm içeriği
V_h	: Karışımın boşluk yüzdesi
w	: Malzemenin birim ağırlığı
z	: Alan altındaki derinlik
Z	: Elastik tabaka çözümünden bulunan düşey gerilme dağıtma faktörü
α, β, ρ	: Regresyon sabitleri
ε	: Şekil değiştirme
ε_ζ	: Elastik çapsal (radyal) şekil değiştirme
$\varepsilon(t)$: Zamanın bir fonksiyonu olarak şekil değiştirme miktarının
ε_d	: Elastik eksenel (düşey) şekil değiştirme
ε_p	: Toplam kalıcı deformasyon
$\varepsilon_p(N)$: N yükleme tekrarı için toplam kalıcı deformasyon
ε_{ps}	: İkincil safha başlangıcındaki kalıcı deformasyon
ε_r	: Elastik (geri dönen) şekil değiştirme
ε_{ST}	: Üçüncül safha başlangıcındaki kalıcı deformasyon
$\varepsilon_{vp}(t)$: Sünme deneyinden ölçülen visko-plastik şekil değiştirme
ε_0	: Sabit düzeydeki anlık şekil değiştirme
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ϕ_f	: Kırılma anındaki içsel sürtünme açısı
γ	: Kayma şekil değiştirmesi
γ_p	: En büyük kalıcı kayma deformasyonu
η, η_0	: Newton orantılılık sabiti, viskozite
η_{20}	: 20 °C'deki viskozite
σ	: Eksenel gerilme
σ_a	: Akma gerilmesi
σ_d	: Eksenel (düşey) gerilme
σ_{dev}	: Deviatör gerilme
σ_f	: Kırılma anındaki normal gerilme
σ_{lab}	: Sünme deneyinin yürütüldüğü gerilme düzeyi
σ_{las}	: Ortalama lastik değme basıncı
σ_n	: n düzlemindeki normal gerilme
σ_{ort}	: Ortalama lastik değme basıncı
$\sigma(t)$: Gerilme rölaksasyonu
σ_{uyg}	: Uygulanan gerilme
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y ve z yönlerindeki normal gerilmeler
σ_0	: t anındaki sabit gerilme
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler
τ	: Kayma mukavemeti
τ_f	: Kırılma anındaki kayma gerilmesi
τ_{maks}	: Maksimum kayma gerilmesi
τ_n	: n düzlemindeki kayma gerilmesi
τ_{okt}	: Oktahedral kayma gerilmesi
τ_x, τ_y, τ_z	: xy, yz ve zx düzlemleri üzerindeki kayma gerilmeleri
ν	: Poisson oranı

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON DİRENCİNİN ÜÇ EKSENLİ KAYMA MUKAVEMETİ DENEYİ İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Analitik tasarımda, yapının analizi için gerekli olan gerilme-şekil değiştirme davranışının belirlenmesinde kaplama tabakalarında kullanılan malzemelerin gerçek mekanik özelliklerine gereksinim duyulmaktadır. Fakat halen yaygın olarak kullanılan Marshall gibi ampirik tasarım yöntemleri gerçek malzeme özelliklerini yansıtmamaktadır. Bunun yanında, Strategic Highway Research Programının (SHRP) son aşaması olan Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) yöntemi karmaşık ve pahalı deney cihazları gerektirmektedir. Dolayısıyla günümüzde ekonomik ve daha basit temel deney yöntemleri araştırılmaktadır.

Üç eksenli kayma mukavemeti (ÜKM) deneyi, özellikle zemin mekaniğinde kohezyonlu ve granüler malzemelerin aksel yüklemeye altındaki kayma direnci ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesinde halen yaygın şekilde kullanılmaktadır. 1950'li yılların başlarında, ÜKM deneyinin asfalt kaplama tasarımında kullanımı araştırılmış ve kohezyon-içsel sürtünme açısı ($c-\phi$) kavramlarını içeren yöntemler önerilmiştir. Fakat ampirik deneylere göre karmaşık olan ÜKM deneyinin uzun zaman gerektirmesi ve deney sonuçlarının arazideki kaplama karışım davranışı ile ilişkilendirilmesindeki zorluklara bağlı olarak bu alandaki çalışmalar sürdürülmemiştir.

Kalıcı deformasyon, bitümün viskoz hale geçmesi sebebi ile agrega tanelerinin birbirini üzerinden yavaşça kayması ile oluşmaktadır. Bu olayın kavramsal açıklaması basit görünmesine karşın niceliksel analizi oldukça zordur. Asfalt kaplamalarda temel bir bozulma tipi olan kalıcı deformasyonların tahminine yönelik farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Kalıcı deformasyonun niceliksel analizinde ÜKM deneyinin, agrega ve bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine etkilerini gerçekçi olarak yansıtaacağı düşünülmüştür. Bitümlü Sıcak Karışımların (BSK) deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçütü olarak kayma gerilmesi parametresinin kullanılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın kapsamı ve amacı vurgulanırken, ikinci bölümde BSK tasarım yöntemleri sunulmuştur. BSK deformasyon davranışı ve deformasyon direncini etkileyen faktörler üçüncü bölümde ayrıntılı olarak tarif edilmektedir. Dördüncü bölümde ise, ÜKM deneyinin BSK tasarımında kullanımı araştırılmıştır. Beşinci, altıncı ve yedinci bölümlerde verilen deneysel çalışmalar ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışımların deformasyon direnci üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ile incelenmiştir. Agrega tane dağılımı, bitüm yüzdesi, bitümlü bağlayıcı kıvamı ve sıcaklığın deformasyon direncine etkileri araştırılmıştır. Bu

amaçla, üç farklı karışım tipi ve üç farklı bitümlü bağlayıcı ve bir adet modifiye bitüm kullanılmıştır. Seçilen karışım tipleri için Marshall tasarımları yapılmıştır. Çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde ÜKM ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Marshall tasarımı, üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri için sırasıyla 132, 236 ve 135 adet numune test edilmiştir. İlk olarak ASTM D 1074’de tanımlanan çift taraflı statik sıkıştırma düzeneği kullanılarak, Aşınma Tip-1 ve Taş Mastik Asfalt-TMA (Stone Mastic Asphalt-SMA) karışımlar için sıkıştırma enerjisinin belirlenmesi amacıyla bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Marshall tokmağı ve statik sıkıştırma yöntemleri ile hazırlanan karışımların Marshall yöntemi kullanılarak optimum bitüm yüzdeleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, agrega tane dağılımı ve bitümlü bağlayıcı yüzdesinin kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla bitümlü karışımlar (Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2) için en az üç farklı bitüm yüzdesinde İzmit B 50-70 bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri 40 °C, 50 °C ve 60 °C’de yürütülmüştür. İkinci bölümde ise, bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi gibi başlıca reolojik özelliklerinin karışımın kalıcı deformasyon direncine etkileri belirlenmiştir. Bu bölümdeki numunelerin hazırlanmasında üç farklı bitümlü bağlayıcı (İzmit B 50-70, Kırıkkale B 50-70 ve Aliağa B 70-100) ve tek tip polimer modifiye bitüm kullanılmıştır. Optimum bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerine 40 °C, 50 °C ve 60 °C’de üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri uygulanmıştır.

Deney sonuçlarına göre, Aşınma Tip-1 ve TMA karışımlar için 40 °C’de test edilen numunelerin deviyör gerilme değerleri karşılaştırıldığında aradaki fark 50 ve 60 °C’lerde test edilen numunelere göre oldukça yüksektir. Ayrıca, 50 °C ve 60 °C’de Aşınma Tip-1’in gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin TMA karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin altına düştüğü kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, kesikli tane dağılımına sahip karışımların (TMA) yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinin sürekli tane dağılımına sahip karışımlardan daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları, bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası ve penetrasyon indeks değerleri büyüdükçe deformasyon direncinin de arttırdığını göstermiştir. Ancak kullanılan bitümlü bağlayıcının, yumuşama noktası değerinin aşıldığı deney sıcaklıklarında, deformasyon direncine katkısının oldukça azaldığı belirlenmiştir. TMA karışımların deformasyon direncinin bitümlü bağlayıcının davranışından daha az etkilendiği görülmektedir. 50 °C ve 60 °C’deki tek eksenli tekrarlı sünme deneyi sonuçları, TMA karışımların Aşınma Tip-1 karışımlara göre daha daha büyük şekil değiştirmelere uğradığını göstermiştir. Bu sonuçlar ÜKM deney sonuçları ile uyum göstermemektedir. Numuneye yanal basınç uygulanamayan tek eksenli tekrarlı sünme deneyinde agrega tane dağılımının kalıcı deformasyon direnci olan olumlu etkisi gözlenmemiştir.

Yukarıda bahsedilen parametrelerin kalıcı deformasyon direncine etkilerini gösteren gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada, Mohr-Coulomb kırılma teorisi kullanılarak karışımların kohezyon ve içsel sürtünme açıları ($c-\phi$) belirlenmiş ve oktahedral kayma gerilmeleri (τ_{okt}) hesaplanmıştır. Oktahedral kayma gerilmesi ve toplam kalıcı şekil deformasyon değerleri arasında iyi derecede bir korelasyonun varlığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, oktahedral kayma gerilmesi, yükleme tekrar sayısı ve sıcaklığı içeren kalıcı deformasyon tahmin modelleri geliştirilmiştir.

INVESTIGATION OF DEFORMATION RESISTANCE OF HOT-MIXED ASPHALT MIXTURES BY TRIAXIAL SHEAR STRENGTH TEST

SUMMARY

In the analytical design, the fundamental properties of materials of pavement layers are required to determine stress-strain behavior of the structure. However, well known empirical design methods such as Marshall and Hveem do not reflect the material properties. On the other hand, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) which is the cutting edge method in Strategic Highway Research Program (SHRP) requires complicated and expensive equipment. Therefore, economical and less complicated methods are investigated.

Triaxial shear strength test is widely used in soil mechanics in order to determine the shear resistance and stress deformation behavior of cohesive and granular materials under axial loading. During 1950's the use of triaxial shear strength test on asphalt pavement designs was investigated and methods based on cohesion-internal friction angle was proposed. However, research in this direction subsequently was discontinued due probably to the complexity of the triaxial shear strength test which are time consuming and the difficulties in relating the test results to field behavior of paving mixtures.

Permanent deformation, a basic damage type in asphalt pavements, occurs due to the slipping of aggregate particles on each other as a result of viscous state of bitumen. Although the conceptual explanation is simple, analysis in terms of property is highly difficult. Various experimental methods have been conducted in the prediction of permanent deformations. Hence, it is concerned that triaxial shear strength tests reasonably reveals the effects of aggregate and bitumen on deformation resistance in the property analysis of permanent deformation. Consequently, it is aimed to use the shear stress parameter as a measure of deformation resistance of hot- mix asphalt.

The study was performed by considering of the purpose is consist of seven parts. In the first chapter, aim and scope of the study was emphasized. Hot-mixed asphalt mixtures design methods presented in the second chapter. In the third chapter, deformation behavior hot-mixed asphalt mixtures and affecting factors on deformation resistance were described in detail. The use of triaxial shear strength test on hot-mixed asphalt design were investigated, in the fourth chapter. Experimental study and results in chapter 5, 6 and 7 was summarized as follow.

In this study the deformation resistances of hot-mixed asphalt mixtures were investigated by the means of triaxial shear strength test. Effects of grading, bitumen content, consistency of bitumen and the temperature on the deformation resistance were examined. For this purpose, three different mixtures and three type of bitumen and one type of modified bitumen were selected. Marshall Mix Design was carried out on three different mixtures. Triaxial shear strength and uniaxial repeated load tests (creep test) were conducted on the specimens prepared by double-plunger static

compression method. In total, 132, 236 and 135 specimens were tested for Marshall Mix Design, triaxial shear strength test and uniaxial repeated load test, respectively. Firstly, a preliminary study carried out the compaction energy for Wearing Course Type-I and Stone Mastic Asphalt (SMA) by using double-plunger compaction equipment as detailed in ASTM D 1074. Later, optimum bitumen contents of mixes prepared utilizing both static and Marshall Compactor were determined by Marshall Mix Design method.

The experimental study had two parts. The effect of mixture gradation and the bitumen content on the permanent deformation resistance were examined in the first part. For this purpose, İzmir B 50-70 bitumen were used in three different contents for bituminous mixtures (Course Type-I and SMA Type-I and SMA Type-II). Triaxial shear strength test and uniaxial repeated load tests were conducted at the three different temperatures (40°C, 50°C, 60°C). The effects of some rheological properties of mixtures namely softening point and penetration index on the permanent deformation resistance were determined in the second part. To investigation permanent resistance deformation three different bitumen (İzmit B 50-70, Kırıkkale B 50-70, İzmir B 70-100) and one type of polymer modified bitumen were used to prepare specimens. Triaxial shear strength test and uniaxial repeated load tests were performed on the specimens prepared by optimum bitumen content at the temperatures of 40, 50, 60 °C.

According to the results, compared to deviator stress values between Wearing Course Type-I and SMA mixtures for specimens tested at 40°C, the discrepancy were relating high than the specimens tested at 50°C and 60°C. Moreover, the deformation resistance of Wearing Course Type-I was reduced more than that of SMA mixtures at 50 and 60°C. It should also be noted that the stress-strain curves related to Wearing Course Type-I were located under those related SMA mixtures. The results revealed that gap grading (SMA) is superior to continuous grading in terms of deformation resistant. Results of the triaxial shear strength tests have showed that deformation resistance increases also by the penetration index and the softening point of bitumen. However, it has been determined that the effect of the softening point of bitumen is extremely small in exceeding testing temperatures and the deformation resistance of SMA mixtures is slightly affected by the behavior of bitumen. Uniaxial repeated load test results showed that TMA mixtures deformed more than Wearing Course Type-I mixtures at 50°C and 60°C. The result was not in accord with triaxial shear strength test results. Therefore, positive effect of gradation on permanent deformation resistance was not observed in uniaxial repeated load test which has not confinement pressure.

More realistic results were obtained from stress-deformation curves showing the effects of above parameters on the deformation resistance. In the study, the cohesion and internal friction angels of mixtures were determined by Mohr-Coulomb failure theory and the octahedral shear stresses were calculated. A significant correlation was found between the octahedral shear stresses and total permanent deformation values. In conclusion, statistical models including octahedral shear stress, number of repetition and temperature were developed to estimated permanent deformations.

1. GİRİŞ

Bitümlü karışımların tasarımı için halen yaygın olarak kullanılmakta olan ampirik yöntemler, sıkıştırılmış karışımların gerçek malzeme özelliklerini tam olarak yansıtamamakta ve yalnızca kabul-red ölçütü olarak kullanılabilir. Diğer taraftan nümerik çözümleme tekniklerinin geliştirilmesi bitümlü karışımların rasyonel veya mekaniksel analizine imkan sağlamıştır. Asfalt kaplamalardaki bozulma problemlerinin tahminine yönelik olan bu yöntemlerde kullanılan temel malzeme özelliklerinin belirlenmesine gereksinim duyulmaktadır.

Günümüzde, artan trafik yoğunluğu ve dingil yüklerinden dolayı oluşan bozulmalara karşı, daha uzun servis ömrüne sahip olan bitümlü sıcak karışımların tasarımı ve üretilmesi için performans esaslı tasarım yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların arazi performanslarına uygun tasarımı, yol malzemelerinin mekanik-ampirik tasarım anlayışının temel prensibini oluşturmaktadır. Asfalt malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir sistem olarak gelişmeye başlayan Stratejik Karayolu Araştırma Programının (Strategic Highway Research Program-SHRP) son aşaması, Yüksek Performanslı Asfalt Kaplamalar (Superior Performing Asphalt Pavements-Superpave) yöntemidir. Superpave yönteminde, kalıcı deformasyon (tekerlek izi oluşumu), yorulma çatlakları ve termal çatlaklar gibi asfalt kaplamaların performansına bağlı bozulma türlerinin araştırılmasını esas alan test cihaz ve yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çerçevede geliştirilen deney yöntemleri ile yollarda gerçekte oluşan bozulmaların tahmini için servis koşullarındaki durumu en iyi şekilde temsil edebilmeyi amaçlamaktadır [1].

Bununla beraber, Superpave yönteminde geliştirilen deney cihazlarının pahalı oluşu, karmaşıklığı ve deneysel işlemlerin uzun zaman alması gibi olumsuzluklar bu cihaz ve deneylerin şantiyelerde kontrol amaçlı kullanımına olanak vermemektedir. Avrupa'da Superpave yönteminin bilimsel esasları kabul edilmekle birlikte sistemin uygulanabilirliğine şüphe ile yaklaşılmaktadır. Superpave yöntemi geleneksel (sürekli tane dağılımlı) karışımlar için geliştirildiğinden SMA ve geçirimli asfalt gibi Avrupa'da çok yaygın olan özel karışımlarının tasarımı için uygun görülmemektedir. Deneylerin karmaşıklığı nedeniyle, doğru sonuç alınabilmesi için çok iyi yetişmiş, deneyimli personele gereksinim duyulmaktadır [2]. Superpave çerçevesinde geliştirilen deneylerin, arazi koşullarını temsil etmediği, tüm performans göstergelerini

yansıtmadığı ve performans tahmininde kabul edilebilir bir model sunmadığı vurgulanmaktadır [2,3]. Bu sebeplerden dolayı, asfalt kaplamaların performans özelliklerinin belirlenmesinde, bu deneylere alternatif daha pratik deney yöntemlerinin araştırılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Uygulama alanındaki birçok kaplama mühendisi ve teknisyen, Superpave yönteminin tecrübe edilmiş deneyleri içermeyişini eleştirmektedir. Bundan dolayı ABD’de daha basit bir performans deneyinin geliştirilmesine son zamanlarda çok önem verilmiştir. Asfalt betonu karışımların tekerlek izi direncinin değerlendirilmesi amacıyla üç eksenli deneyi, son zamanlarda NCHRP Projesi 9-19’da, potansiyel basit performans deneyi olarak değerlendirilen deneylerden biridir. Bu proje kapsamında gerçekleştirilen gerilme deneyleri, karışım davranışına bağlayıcı kıvamının katkısını en aza indirmek için çok yüksek sıcaklıklarda ve yavaş yükleme oranlarında gerçekleştirilmektedir [4].

Arazi koşullarını en iyi şekilde temsil edebilecek performans deneyleri, Avrupa Birliği ülkeleri tarafından yapılan standartlaştırma çalışmalarında da yer almaktadır. “CEN TC 227 WG1” alt çalışma grubu bitümlü karışımların standartlaştırma çalışmalarını halen sürdürmektedir [5].

Genellikle, arazide lastik değme yükü altında oluşan oturmalar ve kalıcı deformasyonların belirlenmesinde kullanılan tek eksenli basınç deneylerinde uygulanan gerilmeler altındaki davranışlar, asfalt kaplama içinde gerçekte oluşan deformasyonu doğru bir şekilde yansıtmayabilir. Malzemenin rijitliğini tanımlayan modül veya parametreler yükleme değişikliklerinde sürekli değişimler göstermektedir. Bu deneyler, özellikle yüksek gerilme düzeylerinde gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntı doğrusal olmadığından, kırılma mekanizmasının ve hızlı bir şekilde oluşan kalıcı deformasyonların belirlenmesinde doğru bir bağıntı vermeyebilir. Dolayısıyla, tek eksenli basınç deneyleriyle kaplamanın servis süresinin başlarında akmasına neden olan gerilme durumu tam olarak modellenememektedir. Buna karşılık, bir kaplama yapısında istenilen bir noktadaki gerilme ve şekil değiştirme büyüklüğü, üç eksenli gerilme durumunun doğrudan bir fonksiyonudur.

Ülkemizdeki yol ağının neredeyse tamamını oluşturan asfalt kaplamalı yollarda, artan taşıt trafiği ve dingil yüklerinin sebep olduğu bozulmaların onarımı için önemli miktarda ekonomik kaynak ayrılmaktadır. Büyük bir kısmı sathi kaplama olan ülkemiz yollarının asfalt kaplama yapılması ve performans ölçütlü tasarım prensiplerine uygun karışım şartnamelerinin geliştirilmesi için Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) çalışmaları Avrupa birliği uyum yasaları çerçevesinde halen devam etmektedir.

Performansa dayalı karışım yöntemlerinin geliştirilmesi yanında, Avrupa ve ABD'de gerek performans gerekse yüzey özellikleri daha iyi düzeyde olan kaplama tiplerinin geliştirilmesine çalışılmakta ve uygulamasına geçilmektedir. Bu kaplama tipleri arasında, tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli olan Taş Mastik Asfalt-TMA (Stone Mastic Asphalt-SMA) kaplamalar Avrupa'da yaygın olarak uygulanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü TMA kaplamalar üzerindeki çalışmalarını gerek laboratuvar gerekse uygulama bazında sürdürmektedir [6,7]. TMA karışımların tasarımında standartlaştırılmış bir yöntem bulunmamaktadır. Fakat bazı ülkeler yoğunluk, boşluk oranı ve agregalar arası boşluk (VMA) gibi karışım özelliklerinin belirlenmesinde Marshall yönteminin kullanılmasını kabul etmişlerdir [8,9]. TMA kaplamaların tekerlek izi direnci geleneksel asfalt kaplamalardan daha iyi olmasına rağmen Marshall deneyinin bunu yansıtmadığı görülmektedir. TMA kaplamaların performans ve yüzey özelliklerinin geliştirilerek gerekli standartların oluşturulmasına ve ülkemizde yaygın olarak uygulamaya geçilmesine katkıda bulunacak çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

Birbirinden tamamen farklı özellikteki iki malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan bitüm-agrega karışımlarının yük altındaki davranışını gerçeğe uygun şekilde yansıtacak bir deney olarak, gerek malzeme gerekse zemin davranışını belirlemede halen kullanılan ve güvenilir sonuçlar alınan üç eksenli kayma mukavemeti deneyi kullanılabilir. Fakat üç eksenli kayma mukavemeti deneyi halen kullanılan kaplama tasarım yöntemlerinde yer almamaktadır.

1950'li yılların başlarında, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) kavramlarının asfalt kaplama karışımların tasarımında kullanılması etkin bir araştırma alanıydı. Bununla beraber araştırmacılar, üç eksenli kayma mukavemeti deneylerinin uzun zaman alması ve karmaşıklığına bağlı olarak karışımların arazideki davranışları ile deney sonuçları arasında bağıntı kurulmasındaki zorluklar sebebiyle bu alandaki çalışmalarını devam ettiremediler. Bugün çok gelişen deney cihazları, analitik yöntem ve hesaplama araçları teorik olarak bu yaklaşımın doğruluğunu göstermişlerdir [10].

Ayrıca son zamanlarda yapılan bazı araştırmalarda, bitümlü sıcak karışımların yoğunluk preslerde sıkıştırılması sırasında belirlenen kayma direncinin, kalıcı deformasyon davranışıyla bağıntılı olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, kayma direnci parametresinin bitümlü sıcak karışımların mekaniksel tasarım yöntemlerinde bir kalite kontrol parametresi olarak kullanılabilmesi vurgulanmaktadır [11].

1.1 Çalışmanın Konusu ve Kapsamı

Kaplama inşaatında kullanılan asfalt betonu karışımların tasarımında, kaplama bozulmalarının en aza indirilmesi amacıyla bağlayıcı ve agrega gibi karışım bileşenlerinin doğru olarak seçilmesi hedeflenir. Halen kullanılan Marshall tasarım yöntemi, sıkıştırılmış bitümlü karışımların içsel sürtünmesi ve rijitliği gibi özelliklerini yansıtmayan ampirik bir yaklaşımdır. SHRP çerçevesinde geliştirilen performans deneylerinin efektif olarak kullanılmayışı, asfalt kaplama karışımlarının performans özelliklerinin belirlenmesinde, bu deneylere alternatif olabilecek deney yöntemlerinin araştırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Üç eksenli kayma mukavemeti deney yöntemi, özellikle zemin mekaniğinde, deney numunelerinin drenaj koşulları ve hücre basıncı ve değişik eksenel yükleme şekilleri altındaki kayma direnci, gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özelliklerinin belirlenmesinde halen yaygın şekilde kullanılmaktadır. Agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşan bitümlü karışımlar, zemin taneleri, su ve havadan oluşan zemin ile büyük ölçüde benzeşmektedir. Dolayısıyla, zemin mekaniğinde geliştirilen üç eksenli deney teorisinin asfalt betonu karışımlara uygulanması mantıklı görülmektedir [12].

Bu tez çalışması, üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametresinin, bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanımını ve özellikle ülkemizin sıcak bölgelerinde yapılan asfalt kaplamalarda çok sık rastlanan kalıcı deformasyonların üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ile incelenmesini konu almaktadır. Geçmişte yapılan çalışmalardan yola çıkılarak üç eksenli kayma mukavemeti deneyi için bir yöntem belirlenmiştir. 101,6 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde olan üç eksenli deney numunelerinin hazırlanmasında ASTM D1074' de belirtilen çift taraflı sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem için bir sıkıştırma düzeneği imal edilmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneylerinin istenilen sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi için sıcaklık kontrollü bir hücre yaptırılmıştır. Ayrıca, aynı yöntemle hazırlanan numuneler üzerinde, kalıcı deformasyon direncinin belirlenmesinde tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deney parametreleri ile tekrarlı sünme deneyi sonuçları arasındaki bağıntılar araştırılmıştır. Kayma mukavemeti parametreleri ile kalıcı deformasyon direnci arasındaki bağıntıyı gösteren modeller oluşturulmuştur.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Bu tez çalışmasıyla, ülkemizde yapılan asfalt kaplamalarda çok sık rastlanan kalıcı deformasyonların en aza indirilmesi için, tasarım yöntem ve ölçütlerinin geliştirilmesine katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bitüm-agrega karışımların kalıcı deformasyon direncinin bağlayıcıdan daha çok agregaya fiziksel özelliklerinden ve tane dağılımından etkilendiği bilinmektedir. Fakat bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin kalıcı deformasyon üzerindeki etkileri tam anlamıyla ifade edilememektedir.

Kalıcı (plastik) deformasyon, bitümün viskoz hale geçmesi sebebi ile agregaya tanelerinin birbiri üzerinden yavaşça kayması ile oluşur. Bu olayın kavramsal açıklaması basit görünmesine karşın niceliksel analizi oldukça zordur. Kalıcı deformasyonun niceliksel analizinde $\tau = c + \sigma \times \tan \phi$ denkleminin, agregaya ve bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine etkilerini gerçekçi olarak yansıtacağı fikrinden yola çıkılarak bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçütü olarak kayma gerilmesi parametresinin kullanılması amaçlanmıştır.

Bu amaçla çalışmada, karışım bileşenlerinin bazı özelliklerinin kalıcı deformasyona etkilerinin belirlenmesi için üç farklı karışım tipi ve dört farklı bitüm türü kullanılmıştır. Sözü edilen karışım tipleri ve bitümlü bağlayıcılar için çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tek eksenli tekrarlı sünme deneyi ve üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları irdelenerek agregaya tane dağılımı, bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası ve penetrasyon indeksleri ve sıcaklığın deformasyon direncine etkileri açıklanmıştır. Ayrıca, Mohr-Coulomb kırılma teorisi kullanılarak karışımların kohezyon ve içsel sürtünme açıları ($c-\phi$) belirlenmiş ve oktahedral kayma gerilmeleri (τ_{okt}) hesaplanmıştır.

Çalışmada incelenen parametreler ve deney sonuçları arasındaki istatistiksel bağıntılar araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, oktahedral kayma gerilmesi ve toplam kalıcı şekil değiştirme değerleri arasında iyi derecede bir korelasyonun varlığı belirlenmiştir. Seçilen karışım türleri için oktahedral kayma gerilmesi, yükleme tekrar sayısı ve sıcaklığı içeren kalıcı deformasyon tahmin modelleri geliştirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN TASARIMI

Bitümlü karışım tasarımının amacı, maksimum kaplama performansının en ekonomik şekilde sağlanmasıdır. Bitümlü karışım tasarım süreci, agrega türü ve tane dağılımı, bağlayıcı türü ve miktarı, katkı malzemesinin türü ve miktarının saptanmasını ve şartname özelliklerini sağlayan bitüm-agrega karışımının üretimini içermektedir [13,14].

Kaplamanın farklı bir amaca hizmet etmekte olan her bir tabakasında kullanılan malzeme kalitesi değişmektedir. Günümüzdeki trafik ve iklim koşullarının sebep olduğu bozulmaları önlemek amacıyla özel bitümlü karışım tipleri geliştirilmiştir. ABD'den daha çok Avrupa'da yaygın olarak kullanılan bu özel karışım tipleri arasında TMA, geçirimli asfalt, ince ve çok ince asfalt kaplamalar yer almaktadır. Standardizasyon çalışmaları sürdürülen bu kaplama tiplerinin tasarımında geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, bu tip karışımların performanslarının belirlenmesinde yeni deney yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [15].

Modern karışım tasarımının temelinde yatan olgu, optimum hizmet performansını sağlamak için kaplamanın maruz kaldığı yapısal etmenler ile trafik ve çevresel koşullara uygun olarak kullanılan mevcut malzemelerin bileşim oranlarının belirlenmesidir. Son yıllarda geliştirilen performans ilişkili ve performans esaslı karışım tasarım yöntemlerinde, laboratuvar ve arazide ölçülen sonuçlar arasında en iyi korelasyonu sağlayan ve farklı gerilme durumlarında malzeme tepkisini ölçebilen benzetim ve temel deneyler kullanılmaktadır. Bu bölümde, bitümlü karışım malzemelerinin nitelenmesinde kullanılan deney tipleri ile ABD ve Avrupa'da kullanılan farklı karışım tasarım yöntemleri özetlenmiştir.

2.1 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımında Kullanılan Mekanik Deneyler

Yol üstyapısının analitik olarak tasarımı, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin tam olarak belirlenebilmesine bağlıdır. Analitik tasarımda, asfalt kaplamaların analizi için gerekli olan gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve bozulma şekillerini (kalıcı deformasyonlar ve çatlaklar) belirleyen iki grup malzeme özelliği dikkate alınmaktadır. Üstyapı tasarımında, malzemenin

arazideki mekanik özelliklerini yansıtan tam ölçekli arazi deneylerinin zorluğu sebebiyle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler büyük önem taşımaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları ve sıkıştırma düzeyi gibi arazi koşulları mümkün olduğunca yansıtılmaya çalışılmaktadır. Fakat arazi koşullarının değişkenliği, uygun deney koşullarının seçilmesini güçleştirmektedir [16].

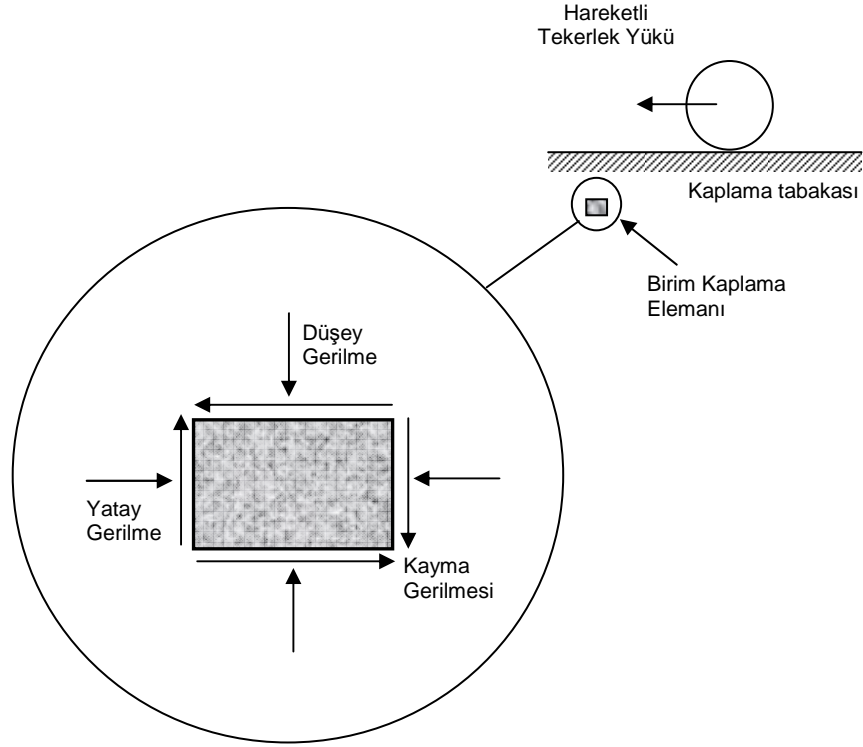
Laboratuvar deneylerinde kullanılan numunelerin gerilme davranışı, karışımın arazide maruz kaldığı gerilme türünden oldukça farklıdır. Arazideki gerilme davranışlarının laboratuvar ortamında sağlanabilmesi oldukça zordur. Şekil 2.1’de taşıt dingil yükünden dolayı birim kaplama elemanı üzerinde oluşan üç boyutlu gerçek gerilme durumunun oldukça basitleştirilmiş bir hali görülmektedir.

Taşıt tekerleğinin birim kaplama elemanı üzerinden geçişi ile asal gerilme eksenlerinin Şekil 2.2’deki gibi yön değiştirmesi sebebi ile düşey basınç, yatay basınç ve kayma gerilmesi Şekil 2.3’de görüldüğü gibi zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu karmaşık gerilme durumu laboratuvar ortamında tam olarak benzetilememesine rağmen, dinamik üç eksenli deney sistemi kayma gerilmelerinin yön değiştirmesi haricinde diğer gerilme durumlarını gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır [16,17].

Kaplama performanslarının yalnızca yapım aşamasında değil, servis ömrü süresince de güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi amacıyla en uygun deney yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Bitümlü karışımların tasarımında kullanılan geleneksel “ampirik” deneylerin yanı sıra, “temel” ve “benzetim” başlığı altında iki farklı kategorideki deneylerin gelişimi göze çarpmaktadır.

Benzetim deneylerinin hiçbiri tek başlarına bitümlü karışımlardan istenilen tüm özelliklerin ve karışım durabilitesinin belirlenmesinde yeterli olmayabilir. Yukarıda bahsedildiği üzere, karışım tasarım ve değerlendirme yöntemlerinde kullanılan deneyler: Ampirik deneyler, benzetim deneyleri ve temel deneyler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılabilir [18].

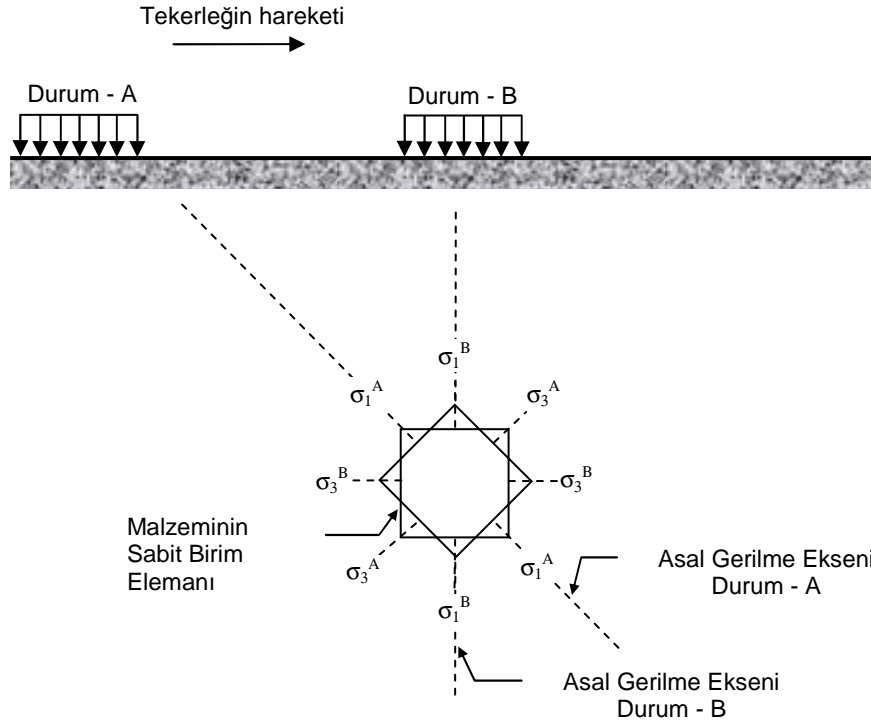
Karışım performansının genel bir değerlendirmesi niteliğinde olan ampirik deneyler, malzemelerin gerçek özelliklerinin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Ampirik deney sonuçları, bir performans göstergesi olan bozulma türleri ile doğrudan ilişkili değildir. Örneğin, halen yaygın olarak kullanılan Marshall deneyinden elde edilen stabilite değeri ile karışımların tekerlek izi direnci arasında iyi bir korelasyon olmadığı bilinmektedir.



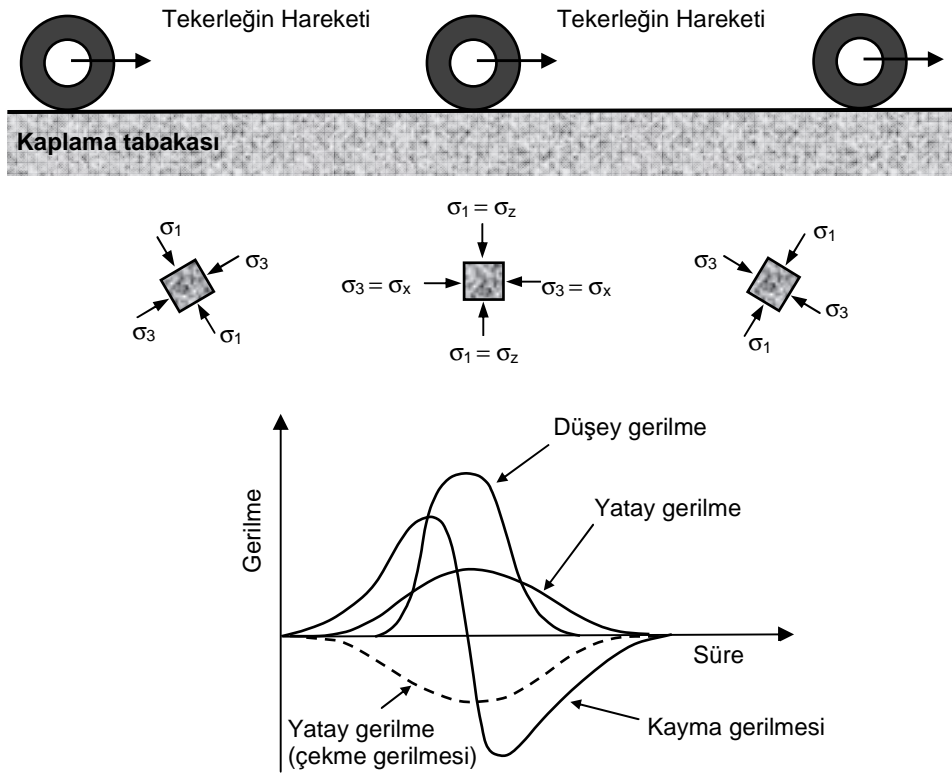
Şekil 2.1: Birim Kaplama Elemanı Üzerinde Oluşan Gerilmeler [16]

Benzetim deneyleri, karışımların üretilmesi, yerleştirilmesi ve kaplamanın servis ömrünü içeren aşamaların laboratuarda benzetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, kaplama performansı ve oluşan bozulmalar ile ilişkilendirilmeye çalışılmaktadır. Karışımların üretilme ve yerleştirilme aşamalarının laboratuarda benzetilmesine yoğurmalı pres, servis ömrü süresince sergileyeceği davranışına da tekerlek izi deneylerini örnek olarak gösterilebilir. Tekerlek izi deneyleri, büyük ve tam ölçekli donanımların kullanıldığı deneylerden, çok daha küçük boyutlu deney cihazlarının kullanıldığı deneylere kadar geniş bir çeşitlilik göstermektedir.

Gerçek karışım özelliklerinin belirlenmesi, kaplama performansını tahmin etmekte kullanılan algoritmanın ilk aşamasını oluşturmaktadır. Temel deneyler kategorisinde yer alan deneyler, malzemelerin gerçek davranışının belirlenmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Bu kategorideki deneyler, geleneksel mekanik deneylerin basitliğinden yoksun olmasına rağmen, numune içerisinde oluşan gerilme durumunun daha iyi yorumlanmasına ve kaplamanın maruz kaldığı gerçek yükleme koşullarının uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu deneylerden elde edilen gerilme ve şekil değiştirme özelliklerinden bitümlü karışımların performansları belirlenebilmektedir. Ölçülen malzeme özellikleri bitümlü karışım performanslarının tahmini için geliştirilen modellerde kullanılabilir.



Şekil 2.2: Taşıt Tekerleğinin Hareketi ile Birim Kaplama Elemanının Asal Gerilme Ekseninin Yön Değişirmesi [17]



Şekil 2.3: Taşıt Tekerleğinin Hareketi ile Gerilmelerde Oluşan Değişmeler [11]

2.2 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri

BSK tasarım yöntemleri ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. Ulusal karışım tasarım yöntemleri aşağıda bahsedilen altı kategoriden en az birini içermektedir. Tablo 2.1’de Avrupa ve ABD’de en yaygın olarak kullanılan tasarım yöntemleri, ölçütleri ve kategorileri özetlenmiştir [15].

Genellikle karışım tasarım yöntemlerinin çoğu, bileşimi bilinen karışım performansına ve deneyimlerine dayanmaktadır. Birçok ülke halen hacimsel, analitik ve performans ilişkili yöntemleri beraberce içeren reçete yöntemleri kullanmaktadır. Avustralya, Belçika, Finlandiya, Hollanda ve İngiltere’de hacimsel ve ampirik tasarım yöntemlerine ilave olarak performans ilişkili yöntemleri de içeren reçete yöntemler uygulanmaktadır. Superpave Kayma Aleti (Superpave Shear Tester-SST) kullanılarak gerçekleştirilen Sabit Yükseklikte Dinamik Kayma Deneyinin (Repeated Shear at Constant Height Test-RSST-CH) yer aldığı SHRP A-698, performans esaslı karışım tasarım yöntemi olarak bilinmektedir [19]. Son zamanlardaki çalışmalar SST’nin malzemenin gerçek tepki parametresinden daha çok indeks parametresini belirleyen bir alet olduğunu göstermiştir.

Çoğu ülkenin tasarım yöntemlerinde, optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi için farklı bitüm yüzdelerinde ve istenilen boşluk düzeyinde test numuneleri hazırlanmaktadır. Karışım performanslarının doğruluğunu kanıtlamak için ampirik, benzetim ve temel deneyler kullanılmaktadır. Fakat Belçika’da, numune hazırlamaya gereksinim duyulmayan analitik yöntem kullanılmaktadır.

Sürekli olarak gelişmekte olan karışım tasarım yöntemlerinden literatürde, standart ve standart olmayan karışım tasarım yöntemleri olarak bahsedilmektedir. Dünyada kullanılan standart BSK tasarım yöntemleri, reçete (recipe), ampirik, analitik, hacimsel, performans ilişkili ve performans esaslı olmak üzere altı kategoriye ayrılmaktadır.

2.2.1 Reçete Tasarım Yöntemleri (Standart Karışım Şartnameleri)

Reçete yöntemleri; belirtilen şantiye, trafik ve hava koşullarında uzun zamanlardan beri başarıyla uygulanan, bileşimi bilinen geleneksel karışım deneyimlerine dayanmaktadır. Bitümlü karışımlar için verilen bir reçete, agrega tane dağılımı, bağlayıcı penetrasyon derecesi, karışım bileşimi, tabaka kalınlığı ve arazideki üretim, yerleştirme ve sıkıştırma aşamalarında ki karışım özelliklerini tanımlamaktadır.

Tablo 2.1: Karışım Tasarım Yöntemleri, Ölçütleri ve Kategoriler [15]

Karışım Tasarım Yöntemi	Deneyimlere Dayanan Karışım Bileşimleri	Numune Üretimi	Hacimsel Ölçüt	Hacimsel Çözümleme/Bileşim	Arazi ile özdeş sıkıştırma yöntemi	Ampirik Test	Benzetim Testleri	Temel Testler	Perf. ilişkili temel özelliklerin kullanılacağı Perform. Tahmin Modelleri	Karışım Tasarım Kategorisi
Avustralya – NARC Rehber '96 Düzey-I	evet	evet	evet	evet ⁹	evet	hayır	evet	hayır	hayır	Reçete / Hacimsel
Avustralya – NARC Rehber '96 Düzey-II/III	evet	evet	evet	evet ⁹	evet	hayır	evet	evet	hayır	Reçete / Hacimsel / Performans ilişkili
Belçika – CRR R61/87	hayır ^a	hayır ^b	evet ^b	evet	hayır	evet ^b	hayır	hayır ^d	hayır	Analitik / Ampirik
Belçika CRR 1996 (taslak)	hayır ^a	hayır ^b	evet ^b	evet	hayır ^c	evet ^b	evet ^b	hayır ^d	hayır	Analitik / Ampirik / Performans ilişkili
Finlandiya ASTO / PANK '95	evet	evet	evet	evet ⁹	evet	hayır	evet	evet	hayır	Reçete / Hacimsel / Performans ilişkili
Fransa AFNOR	evet	evet	evet	evet ⁹	evet	evet	evet	Evet ^e	hayır	Reçete / Hacimsel / Performans ilişkili
Almanya – DIN	evet	evet	evet	hayır	hayır	evet	hayır ^d	hayır ^d	hayır	Reçete / Ampirik
İtalya – CNR, ANAS & AUTOSTRADE	evet	evet	evet	hayır	hayır ^d	evet	hayır	hayır ^d	hayır	Reçete / Ampirik
İsviçre – SN 640431a	evet	evet	evet	hayır	hayır	evet	hayır	hayır	hayır	Reçete / Ampirik
Hollanda – RAW Standartları	evet	evet	evet	hayır	hayır	evet	hayır	hayır	hayır	Reçete / Ampirik
Hollanda CROW (Taslak)	hayır ^a	evet	evet	evet ⁹	evet	evet	evet	evet	hayır	Hacimsel / Performans ilişkili

Tablo 2.1: Karışım Tasarım Yöntemleri, Ölçütleri ve Kategoriler (Devamı)

Karışım Tasarım Yöntemi	Deneyimlere Dayanan Karışım Bileşimleri	Numune Üretimi	Hacimsel Ölçüt	Hacimsel Çözümleme/Bileşim	Arazi ile özdeş sıkıştırma yöntemi	Ampirik Test	Benzetim Testleri	Temel Testler	Perf. ilişkili temel özelliklerin kullanılacağı Perform. Tahmin Modelleri	Karışım Tasarım Kategorisi
İngiltere – BS 594 / BS 4987	evet	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	Reçete
İngiltere – BS 598	evet	evet	hayır	hayır	hayır	evet	hayır	hayır	hayır	Reçete / Ampirik
İngiltere Nottingham University	hayır ^a	evet	evet	evet ^g	evet	hayır	evet	evet	hayır	Hacimsel / Performans ilişkili
ABD-Asfalt Enstitüsü '84/91'	hayır ^a	evet	evet	hayır	hayır	evet	hayır	hayır	hayır	Ampirik
ABD - SHRP Superpave Düzey-I	hayır ^a	evet	evet	evet ^g	evet	hayır	evet	hayır	hayır	Hacimsel
ABD - SHRP Superpave Düzey-II	hayır ^a	evet	evet	evet ^g	evet ^k	hayır	evet	evet	evet ^f	Hacimsel / Performans Esaslı
ABD - SHRP Superpave Düzey-III	hayır ^a	evet	evet	evet ^g	evet ^k	hayır	evet	evet	evet	Hacimsel / Performans Esaslı
ABD SHRP-A-698	hayır ^a	evet	evet ^h	evet ^g	evet	hayır	hayır	evet	evet	Hacimsel / Performans Esaslı

^a Evet, yalnızca kullanılan bazı ölçütlerde

^b Evet, yalnızca temel karışımların doğrulanmasında

^c Evet, yalnızca benzeşim ve temel testler

^d Yalnızca özel tasarımlarda kullanılan, alışlagelen karışım tasarımında kullanılmayan sıkıştırma ve test yöntemleri

^e Geleneksel olmayan, performans bilinmeyen malzemeli tamamen yeni formüller için yürütülür

^f Gerçek performans ve laboratuvar tahmin performansı arasında bir karşılaştırma referansı olmayan

^g Yalnızca hacimsel tasarım

^h Karışımın istenilen performansı sağladığı durum için arazide beklenen hacimsel özellikler

^k Bazı araştırmacılar yoğunmalı pres ile performans esaslı tasarımlar için uygun numunelerin üretilmediğini savunmaktadır.

Reçete şartnameleri, kullanımı basit ve her tipteki karışıma uygulanabilir yöntemlerdir. İstenilen karışımın üretim aşamasında ve belirtilen şartnameye uygunluğunun kontrol edilmesinde çok az zorlukla karşılaşılmaktadır. Reçete yöntemlerin, başta İngiltere olmak üzere birçok ülkede uygulamalarına rastlanmaktadır.

Bununla birlikte, reçete yöntemlerinin birkaç önemli sınırlaması bulunmaktadır. Karışımın maruz kalacağı dingil yükleri, iklim vb. koşulların reçete şartnamelerinin ilk uygulandığı koşullarla aynı olmayacağı doğaldır. Ayrıca, karışımı oluşturan malzemelerin özellikleri daha önce kullanılanlarla aynı olmayabilir. Reçete yöntemlerde, iyileştirme yapılmasını gerektiren bu farklılıkların etkilerini belirlemek için hiçbir yöntem bulunmamaktadır. Bu şartnamelerin esası, belirli bir agrega türü ve tane dağılımına dayanmakta, agrega özellikleri, tane dağılımı ve sıkıştırma özellikleri dikkate alınmamaktadır. Dolayısıyla, şartnamede belirtilenden farklı agregaların kullanıldığı karışımlarda bu şartnamelerin güvenilirliği azalmaktadır.

Reçete şartnamelerinde yer almayan bazı laboratuvar ve arazi deneyleri ile karışımların mühendislik özellikleri incelendiğinde, yalnızca reçete şartnamelerine bağlı kalmanın zayıflık olduğu ortaya çıkmaktadır. Reçete şartnameleri yeni gelişmelerin uygulanmasına ve ucuz yerel malzemelerin kullanılmasına sınırlandırma getirmektedir.

2.2.2 Ampirik Tasarım Yöntemleri (Marshall Deneyi)

Ampirik deneylerin kullanıldığı karışım tasarım yöntemlerinde, optimum bağlayıcı miktarı seçimi, önceki deneyimlerle sınır değerleri belirlenmiş birkaç parametrenin optimizasyonuna dayanmaktadır. Bu parametreler, doğrudan doğruya performans ölçütü olarak kullanılmamaktadır.

Bu yöntemde numuneler, arazide uygulanan sıkıştırma koşullarını yansıtmayan bir sıkıştırma yöntemiyle hazırlanmakta ve gerçek malzeme özelliklerini ölçemeyen mekanik-ampirik deney yöntemleri kullanılarak test edilmektedir.

Reçete esaslı bitümlü karışım tasarımlarını bir adım daha ileriye taşıyabilmek amacıyla geliştirilen ampirik tasarım yöntemleri bağlayıcının visko-elastik doğasını dikkate almamaktadır. Bu yöntemler, bitümlü karışımların stabilitesini belirleyen basit deneyleri içermektedir.

Bu kategoride yer alan Marshall yöntemi pratikliği ve ekonomikliği sebebiyle birçok ülkede halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Hacimsel analiz için hazırlanan

numunelerin aynı zamanda deneylerde kullanılması, zaman ve malzeme yönünden bu karışım tasarım yönteminin bir avantajıdır. Ayrıca, numune sıkıştırma yöntemi arazide kullanılan sıkıştırma yöntemi ile benzeşmemektedir. Bu yöntem, numune kalıplarının çapı 101,6 mm olduğundan en büyük agrega boyutu 25 mm'nin üzerinde olan bitümlü temel tabakalarının tasarımı için uygun değildir [16].

Ampirik bir deneyin kullanıldığı bu yöntem günümüz koşullarında yetersiz kalmaktadır. Bitümlü karışımların temel özelliklerini yansıtmayan Marshall yöntemi ile tasarlanan kaplamalarda artan bir şekilde tekerlek izi problemlerine rastlanmaktadır.

Sıcak Silindirlenmiş Asfalt (Hot Rolled Asphalt) tasarımında kullanılan İngiliz Marshall tasarım yönteminde ASTM D1559 yöntemindeki gibi hesaplanan optimum bitüm yüzdesi değeri kaba agrega yüzdesinin fonksiyonu olan bir düzeltme faktörü kullanılarak optimum bağlayıcı miktarı belirlenmektedir [20].

Marshall tasarım yöntemi, Almanya'da bitümlü temel tabakalarının tasarımında kullanılırken, İtalya, Hollanda ve İsviçre'de agrega ve filler yüzdesi, bitüm türü ve yüzdesi ile bitüm penetrasyon derecesini içeren bir reçete yönteme ilave olarak uygulanmaktadır. Bu ülkelerde, karışımın optimum bileşimi stabilite, akma ve boşluk analizleri ile belirlenmektedir.

2.2.3 Analitik Tasarım Yöntemleri

Analitik tasarım yönteminde, karışımın hacimsel bileşimi (agrega, bitüm ve boşluk yüzdeleri) karışımlar üzerinde yapılan deneylere bağlı kalmaksızın bilgisayar ortamında yapılan analitik hesaplamalarla belirlenmektedir. Ayrıca, bitümlü karışımların visko-plastik ve yorulma mukavemeti gibi gerçek özelliklerinin tahminine imkan sağlanmaktadır.

Bu yöntemde esas alınan hacimsel yaklaşım kavramının amaçlarından biri, bitümlü karışımlar için gerekli mastik (ince agrega+filler+bitüm) miktarını doğru olarak belirleyebilmektir.

Analitik yöntem, bilgisayar yazılımı olmaksızın kullanıldığında yorucu hesaplamalar gerektirir. Karışım tasarımında sadece analitik yöntemle başvurulduğunda, bitümlü karışımların iyi bir performans sergileyeceği garanti edilememektedir. Dolayısıyla, doğru tahminler için bu yöntemle beraber en az bir deneyin uygulanmasına gerek duyulmaktadır.

Belçika analitik yönteminde (Code de bonne pratique), bitümlü karışımların bileşimini hacimsel olarak belirlemek için analitik hesaplamalar kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemde, karışım bileşiminin hesaplanan hacimsel değerlerinin bazı deneyler vasıtasıyla doğruluğunun kanıtlanmasına önem verilmektedir. Kullanılan bu analiz programının (Code de bonne pratique) 1987 versiyonunun doğruluğu, Marshall deneyleri ile kanıtlanmıştır. Karışımın agrega iskeletinin dikkate alındığı son versiyonunda ise geçirimli asfalt için “Cantabro” deneyi kullanılırken, kum iskeletli karışımlar için Marshall deneyi ve SMA gibi mastik miktarı fazla karışımlar için tekerlek izi deneyleri önerilmektedir [15].

2.2.4 Hacimsel Tasarım Yöntemleri

Arazi sıkıştırmasıyla benzer olarak laboratuarda üretilen numunelerin hacimsel oranları, karışımların mekanik performansı ile ilişkilidir. Bu varsayıma dayanan hacimsel karışım tasarım yöntemlerinde, optimum bağlayıcı miktarı ve agrega tane dağılımının seçimi, agrega ile bağlayıcı ve hava boşluğu için hacimsel oranların analiziyle elde edilmektedir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için testler uygulanmamaktadır. Hacimsel karışım tasarım yöntemleri, uygulanabilirliğindeki kolaylık ve özel bir donanım gerektirmediğinden ilave bir maliyet getirmemektedir. Normalde, iyi bir hacimsel özellik sergileyen karışımın, yeterli Marshall stabilite değerine sahip olduğu söylenebilir. Ancak bazen uygun olmayan hacimsel özelliklere sahip karışımlar, iyi bir performans sergileyebilmektedir.

Geleneksel Marshall tasarım yönteminde, laboratuarda sıkıştırılan bitümlü karışımların hacimsel özellikleriyle ilişkili bazı ölçütler belirlenmiştir. Arazideki hacimsel kabul ölçütleri ile bağlantılı olan bu özellikler, deneyimlere dayanan bir uygunluk fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Geliştirilen laboratuvar sıkıştırma yöntemleri ile arazideki sıkışma mümkün olduğunca temsil edilmeye çalışılmaktadır. Bu çerçevede yağurmalı presin gelişimi, hacimsel yaklaşıma dayanan karışım tasarım yöntemlerinin güvenilirliğini arttırmıştır.

Hacimsel tasarım yöntemlerinin çoğu, sıkıştırma enerjisindeki artış ile hacimsel yoğunluk artışını gözleyen ve arazideki sıkışma işlemini laboratuarda büyük oranda sağlayan yağurmalı pres kullanarak hazırlanan karışımları incelemektedir. Hacimsel karışım tasarım yöntemleri doğrudan doğruya karışımın mekanik özelliklerini ölçmemekte ve mekanik performansını tahmin edememektedir. Yüksek trafik hacmine sahip yolların kaplama performansının doğru olarak tahmin edilebilmesi için hacimsel karışım tasarım yöntemi ile birlikte en azından bir mekanik deneyin uygulanmasına gereksinim duyulmaktadır.

Yoğurmalı pres analizi, aynı zamanda karışımın işlenebilirliği ve tekerlek izi eğilimi hakkında bir fikir vermektedir. Fakat yüksek sıcaklık ve çok yavaş seyreden ağır taşıt trafiğine maruz kalan yolların tasarımında kalıcı deformasyon direncinin değerlendirilmesi için başka bir deneye gereksinim duyulmaktadır. Yoğurmalı pres kullanılarak elde edilen sıkışma verileri (devir sayısının bir fonksiyonu olarak hava boşluğu miktarı), dakikada ki devir sayısı ve dönme açısının bir fonksiyonudur. Bu parametrelerin herhangi birindeki küçük bir değişme, sıkışma veri ve ölçütü üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Yoğurmalı pres, işlenebilirlik üzerine agrega tane dağılımının etkisinin belirlenmesine yönelik bir bitümlü karışım tasarımı sağlamaktadır. Fakat bağlayıcının etkisinin değerlendirilmesine uygun olmayan bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir.

Superpave karışım tasarım sisteminin Düzey-1'i hacimsel tasarım olarak tanımlanmaktadır. Düzey-1'de düşük trafik hacmine sahip yollar için mekanik bir deneye başvurmaksızın yeterli performansı sağlayan bir karışımın elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde, optimum bitüm yüzdesi, hava boşluğu, mineral agregalar arası boşluk ve bitümlü dolu boşluk yüzdesi parametrelerine ait değerler dikkate alınarak belirlenmektedir. Ayrıca Düzey-1 performans esaslı bitüm şartnameleri ve agrega tane dağılımı için performans ilişkili bazı şartnameleri kapsamaktadır.

Avustralya Ulusal Asfalt Araştırma Komitesi (National Asphalt Research Committee-NARC) karışım tasarım yönteminin Düzey-1'i de bu kategoride yer almaktadır. Bu yöntemde, Avustralya yoğurmalı presi kullanılarak farklı devir sayıları için numune yoğunlukları ve diğer hacimsel parametreler hesaplanmaktadır. NARC Düzey-1'de önceki çalışmalara göre veya minimum bitüm film kalınlığı sağlayacak şekilde seçilen bir deneme bitüm yüzdesinde üç adet numune hazırlanması öngörülmektedir. Optimum bitüm yüzdesi, trafik düzeyine bağlı olarak seçilen boşluk oranının elde edildiği bitüm yüzdesi olarak tanımlanmaktadır.

Finlandiya Asfalt Kaplama Araştırma Programı (Finnish Asphalt Pavement Research Program-ASTO)'nun Düzey-1'i hacimsel karışım tasarımını kapsamaktadır [21]. Bu yöntemde, belirlenen hacimsel parametreler (hava boşluğu, mineral agregalar arası boşluk ve bitümlü dolu boşluk) karışım tipine ait hacimsel tasarım ölçütü ile karşılaştırılmaktadır. Sıkışma ve hacimsel özellikler, Finlandiya yoğurmalı presi (Intensive Compactor Tester-ICT) kullanılarak belirlenmektedir. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesinde, mineral agregalar arası boşluğun %85'e eşit olduğu nokta dikkate alınmaktadır. Bu değer, iki veya üç agrega tane dağılımı için belirlenmekte ve onlar arasından en iyi performansı sergileyen karışım seçilmektedir.

2.2.5 Performans İlişkili Tasarım Yöntemleri

Performans ilişkili karışım tasarım yöntemlerinde, hacimsel ölçütleri sağlayacak şekilde sıkıştırılan karışımlar performans özelliklerinin tahmini için benzetim veya temel deneylere tabi tutulmaktadır. Arazi davranışı ile laboratuvar ölçüm sonuçları arasında iyi bir korelasyon sağlayan bu yöntem, yeni malzemelerin kullanımını ve yenilikleri desteklemektedir.

Yol üstyapısındaki viskoz ve visko-elastik tabakaların oluşturduğu kaplamaların tasarımında rasyonel kaplama tasarım yöntemlerinin gelişimi, trafik yüklerinin oluşturduğu gerilme durumlarının incelenmesini gerektirmektedir. Bu gereklilik, farklı tabakaların yapımında kullanılan karışımların gerçek mekanik özelliklerinin ölçülmesinde temel deneylerin gelişimine rehberlik etmiştir. Karışım tasarım yönteminin bir bölümünü oluşturan temel deneyler tasarım hesaplarının girdilerini sağlamamaktadır. Geleneksel yöntemlerin kaplamada kullanılan uygun malzeme performanslarını belirlemekteki yetersizliği sebebiyle geliştirilen diğer bir deney tipi ise benzetim deneyleri olarak tanımlanmaktadır. Benzetim deneyleri, farklı karışımların sınıflandırılması ve performans parametrelerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Fransız Standartlar Birliği (Association Française pour la Normalization-AFNOR) karışım tasarım sistemi [15], yoğurmalı pres ve tekerlek izi gibi benzetim deneylerinin kullanımına dayanmaktadır. Yoğurmalı Pres (Presse á Cisaillement Giratoire-PCG), karışımın karışım tipinin belirlenmesinde, malzeme ve agrega tane dağılımı ile ilgili çeşitli parametrelerin seçiminde kullanılmaktadır. Karışımın su hasarına karşı direnci, bir serbest basınç deneyi olan Duriez deneyi ile kontrol edilmektedir. Karışım performansının değerlendirilmesinde, kalıcı deformasyon direnci, rijitlik modülü ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikler dikkate alınmaktadır. Karışım davranışının mekanik özelliklerinin saptanması için yapılan deneyler, zaman ve maliyet açısından önemli olduğundan tüm durumlar için zorunlu tutulmamaktadır. Tekerlek izi deneyi, ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yolların tasarımında kullanılmaktadır. Modül ve yorulma mukavemetinin belirlenmesinde yapılan deneyler ise, sadece Fransız Kaplama Şartnamesinde (French Pavement Catalogue) yer almayan farklı kaplama koşulları için gerçekleştirilmektedir.

İngiltere’de Nottingham Üniversitesinde geliştirilen karışım tasarım yönteminde, hava boşluğu yüzdesi, agregalar arası boşluk ve bitümle dolu boşluk gibi hacimsel parametre limitlerine göre bir karışım bileşimi seçilmektedir. Sonrasında, bu karışımlar için malzeme özellikleri belirlenmektedir. Nottingham Asfalt Deney Aleti (Nottingham Asphalt Tester-NAT) ile yapılan tekrarlı-yüklemeli dolaylı çekme

modülü ve rijitlik modülü deneyleri yorulma direncini, tekrarlı yüklemeli ve eksenel statik sünme deneyleri ise kalıcı deformasyon direncini ölçmek için kullanılmaktadır.

NARC karışım tasarım yönteminin Düzey-2'si de performans ilişkili olarak tanımlanmaktadır. Bu deney yönteminde, Malzeme Deney Aparatları (Materials Testing Apparatus-MATTA) ismiyle Avustralya'da üretilen bir deney cihazı kullanılmaktadır. NAT aleti ile benzer olan bu cihazla, karışımların rijitlik modülü (tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi), kalıcı deformasyon direnci (dinamik sünme deneyi) ve yorulma mukavemeti (tekrarlı yüklemeli kiriş eğilme deneyi) özellikleri belirlenebilmektedir. Bu yöntemin Düzey-1'inde hacimsel analiz için kullanılan silindirik deney numuneleri Avustralya yağurmalı presi ile hazırlanmaktadır. Kalıcı deformasyon direncinin daha büyük olması gereken ağır taşıt trafiği fazla olan yollar için NARC Düzey-3'te tekerlek izi deneyi ve yoğunluk kontrolleri gerçekleştirilmektedir.

Finlandiya ASTO karışım tasarım yönteminin Düzey-2'sinde, hacimsel ölçütlere dayandırılarak seçilen karışımın bazı performans özellikleri belirlenmektedir. Arazideki en önemli kaplama özelliği olarak çivili lastiklerden kaynaklanan aşınma dikkate alınmaktadır. Bunun yanında Düzey-2'de, kalıcı deformasyon ve su hasarı direncinin değerlendirilmesi öngörülmektedir. Kalıcı deformasyon direnci, tekrarlı yüklemeli sünme deneyi veya tekerlek izi deneyi kullanılarak; su hasarı direnci ise dolaylı çekme deneyi ile belirlenmektedir. Bu tasarım yönteminin Düzey-3'ü dolaylı çekme deneyi vasıtasıyla karışımın düşük sıcaklık çatlak direncinin belirlenmesini de kapsamaktadır.

Hollanda'da CROW (Centre for Research and Contract Standardization in Civil and Traffic Engineering) çalışma grubu tarafından hazırlanan tasarım yönteminde, Marshall tasarım yönteminin yerini performans ilişkili bir yöntem almaktadır.

2.2.6 Performans Esaslı Tasarım Yöntemleri

Performans esaslı karışım tasarım yönteminde, öncelikle yukarıda belirtilen yöntemlerden herhangi biriyle tasarlanan bir karışıma performans esaslı deneyler uygulanmaktadır. Kaplamadan beklenen performans, arazi değerleri kullanılarak kalibre edilen tahmin modelleri ile değerlendirilmektedir.

Bu yöntemde laboratuarda sıkıştırılan numuneler, performansla ilişkisi kanıtlanmış ve malzeme davranışı modellerinde girdi olarak kullanılan temel özelliklerin belirlenmesi için test edilmektedir. Proje verileri (kaplama yapısı, trafik ve iklim) malzeme özellikleri, çevresel etkiler, kaplamanın tepkisi ve bozulma türleriyle ilişkili

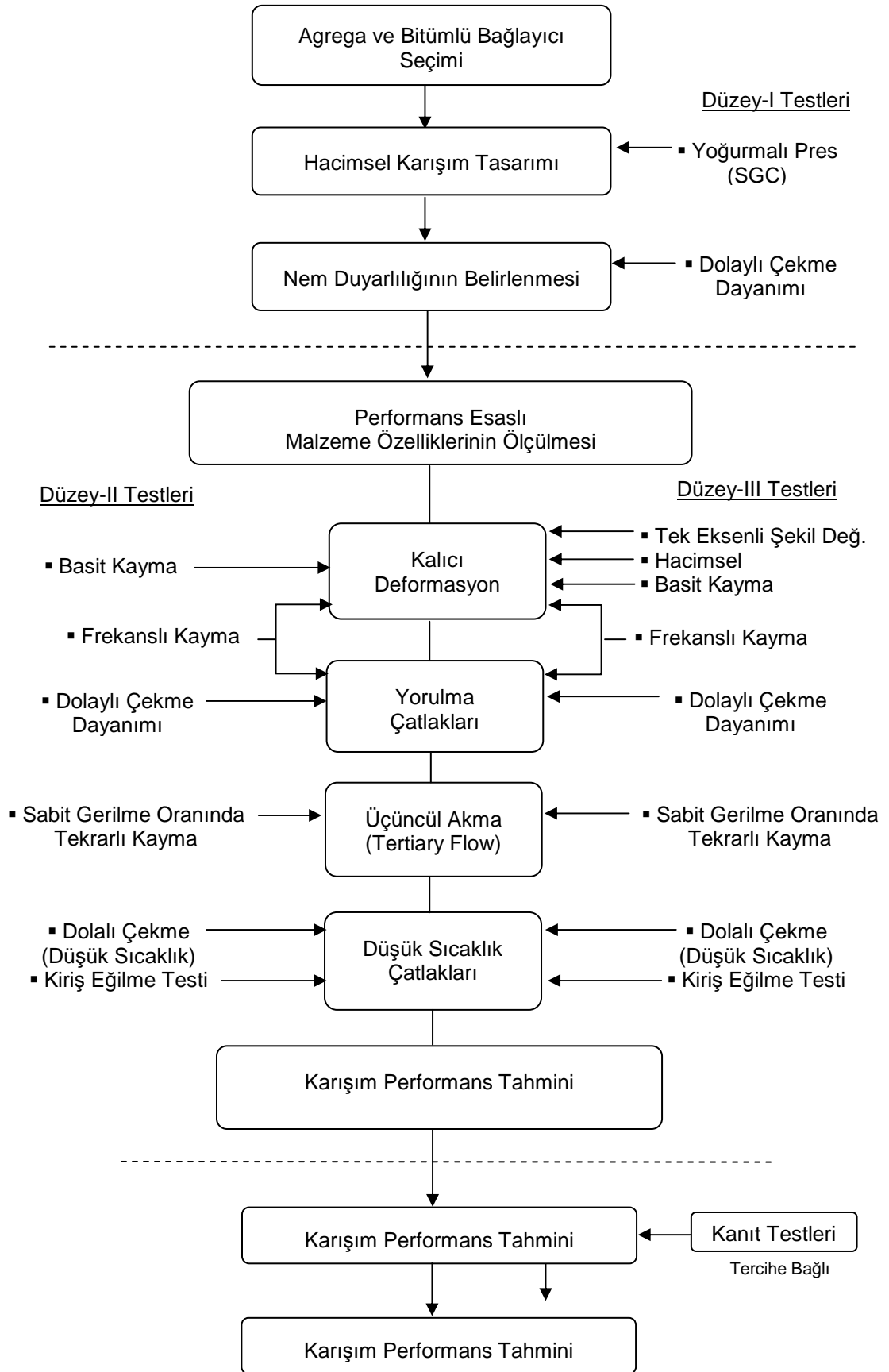
farklı modeller, kaplama performansının tahmini için kullanılmaktadır. Bu yöntem, kaplamanın servis ömrü boyunca farklı bozulma türlerinin gerçekçi bir tahminini sağlamaktadır. Laboratuarda gözlemlenen performans araziden beklenen performansa, önceki arazi deneyimlerinin kalibrasyonundan elde edilen “dönüştürme faktörü” ile dönüştürülmektedir.

Performans esaslı karışım tasarım yöntemi, performans ilişki tasarım yönteminde olduğu gibi yeni gelişen malzemelerin kullanımını ve yenilikleri desteklemektedir. Bu yöntem, seçilen servis ömrü süresince kaplamadan beklenen bozulma gelişimini ve bitümlü karışımların davranışını laboratuarda gerçekleştirilen deneylerle tahmin etmeyi sağlamaktadır. Performans esaslı yöntemlerde, hacimsel parametreler üzerinde belirli limitlerin oluşturulmasına gereksinim duyulmamakta, sadece arazide beklenen hacimsel özelliklerin istenilen performansı sergilemesi beklenmektedir. Optimum bağlayıcı yüzdesi, her bir bozulma türü için istenilen performans düzeyine bağlı olarak belirlenmektedir.

Karışım tasarım yönteminde kullanılan deneylerin etkinliğinin, arazi veya gerçek-ölçekli deneyler vasıtası ile kanıtlanması gerekmektedir. Bu yöntemde kullanılan deney aletlerinin duyarlı olması ve karmaşıklığı, karışım üretim plantlerinde ürün kontrolü ve sıradan tasarım çalışmalarında kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Sadece, kapsamlı araştırmalar gerektiren özel projelerde kullanılabilir. Trafik hacminin düşük olduğu durumlarda bu yöntemin kullanılması tasarım maliyeti açısından uygun olmayabilir.

Performans esaslı karışım tasarım yöntemi için ilk önerilerden biri, ABD’de SHRP kapsamında sunulmuştur. 1987 ve 1992 yılları arasında yirmi beşten fazla araştırma bölgesini içeren araştırmaların sonuçlanmasıyla bitümlü karışım tasarımı ve özelliklerinin saptanması için Superpave karışım tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Şekil 2.4’te akış diyagramı verilen bu tasarım sistemi, üç farklı tasarım düzeyini içermektedir.

Standartlaştırılan yoğurmalı presin (Superpave Gyrotory Compactor-SGC) kullanıldığı Düzey-1, düşük trafik koşullarında hacimsel karışım tahmin modellerini içermektedir. Ayrıca, Düzey-1’de yine SHRP projesi kapsamında SHRP A-698 tasarımını ve geliştirilen performans dereceli bağlayıcı şartnamesini kullanarak bağlayıcı seçimini yapmaktadır. Düzey-2, orta trafik hacmi için bozulma tahmin modellerini oluşturacak performans deneylerini kapsamaktadır. Düzey-3’de ise, ağır trafik düzeyi için yoğun bir malzeme deney programı ve karmaşık bozulma tahmin yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 2.4: Superpave Karışım Tasarım Yöntemi Akış Diyagramı [3]

Düzeş-2 ve Düzeş-3'ü performans esaslı karışım tasarımı olarak tanımlanmakta ve dolaylı çekme aleti ve kayma deney aleti kullanılmaktadır. Superpave yönteminin Düzeş-1'indeki hacimsel tasarım yöntemi kullanılarak bir başlangıç tasarım bitüm yüzdesi belirlenmektedir. Düzeş-1 için yoğurmalı presin kullanımı standartlaştırılmıştır. Sonrasında, seçilen karışım için farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanan numuneler üzerinde performans düzeyine göre bir grup deney uygulanmaktadır. Bu deney sonuçları kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları yönünden kaplama performansının tahmininde kullanılmaktadır. Optimum bitüm yüzdesi, Superpave bilgisayar yazılımı ile yapılan performans tahminlerinin sonucunda belirlenmektedir.

SHRP projesinin bir bölümünü üstlenen bazı araştırmacılar tarafından sunulan SHRP A-698 karışım tasarım yöntemi de performans esaslı olarak nitelendirilmektedir. Bu tasarım yöntemi, çeşitli bozulma türleri ile bağlantılı olan karışım fiziksel özelliklerinin ölçülmesine dayanmaktadır. SHRP A-698'de, belirtilen koşullar için yorulma çatlakları ve kalıcı deformasyon direnci ölçütlerinin sağlanacağı tasarım bitüm yüzdesinin belirlenmesine çalışılmaktadır. Karışımların yorulma çatlağı ve kalıcı deformasyon direncinin değerlendirilmesinde, SHRP A-003A projesi kapsamında geliştirilen sabit yükseklikte tekrarlı basit kayma deneyi ve kiriş eğilme deneyi gibi temel deneyler kullanılmaktadır.

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞI

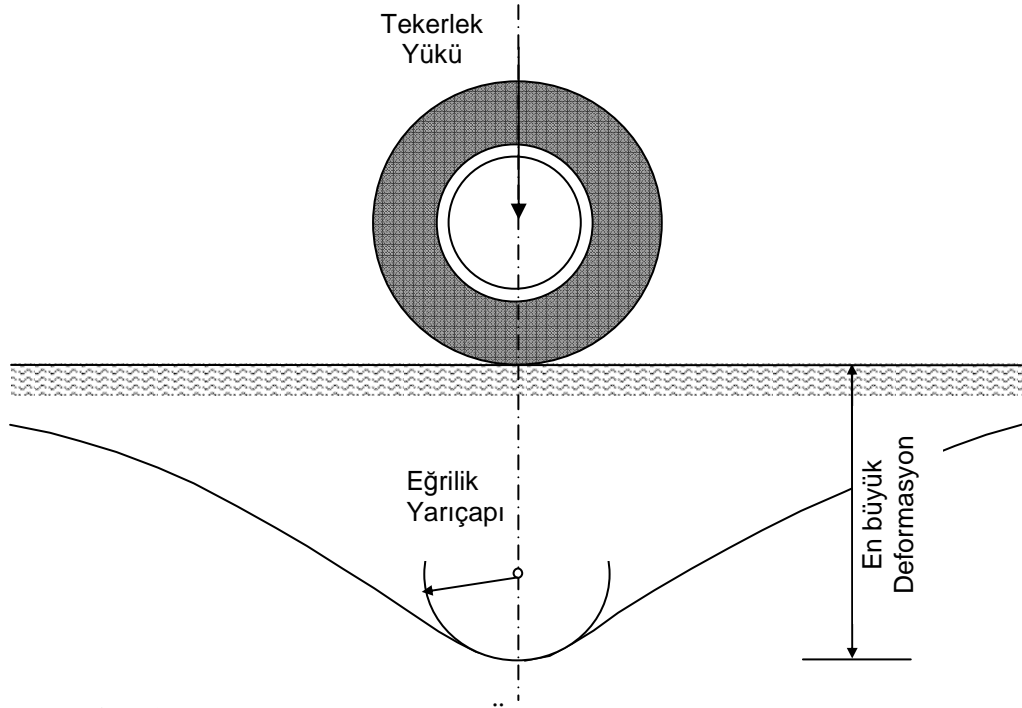
Bu bölümde, bitümlü sıcak karışımların davranışı incelenmiş ve kullanılan deney yöntemlerinin altında yatan kuram tanımlanmıştır. Dolayısıyla, malzeme modelleri, gerilmeler sebebiyle oluşan bozulma türleri ve özellikle kalıcı deformasyonlar üzerinde durulmuştur.

Asfalt kaplamalarda oluşan deformasyonlar, hareket halinde olan veya duran taşıtların tekerlek bandajları vasıtasıyla yola uyguladıkları gerilmelerden oluşur. Yol yüzeyi ile tekerlek arasında etkiyen düşey yükler ve yatay kayma kuvvetleri yol tabakalarında basınç, çekme, eğilme ve kayma gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler, dingil yükü, bandajın şişirme basıncı, taşıtın hızı, bandajın üzerindeki yiv ve setler gibi birçok faktöre bağlıdır.

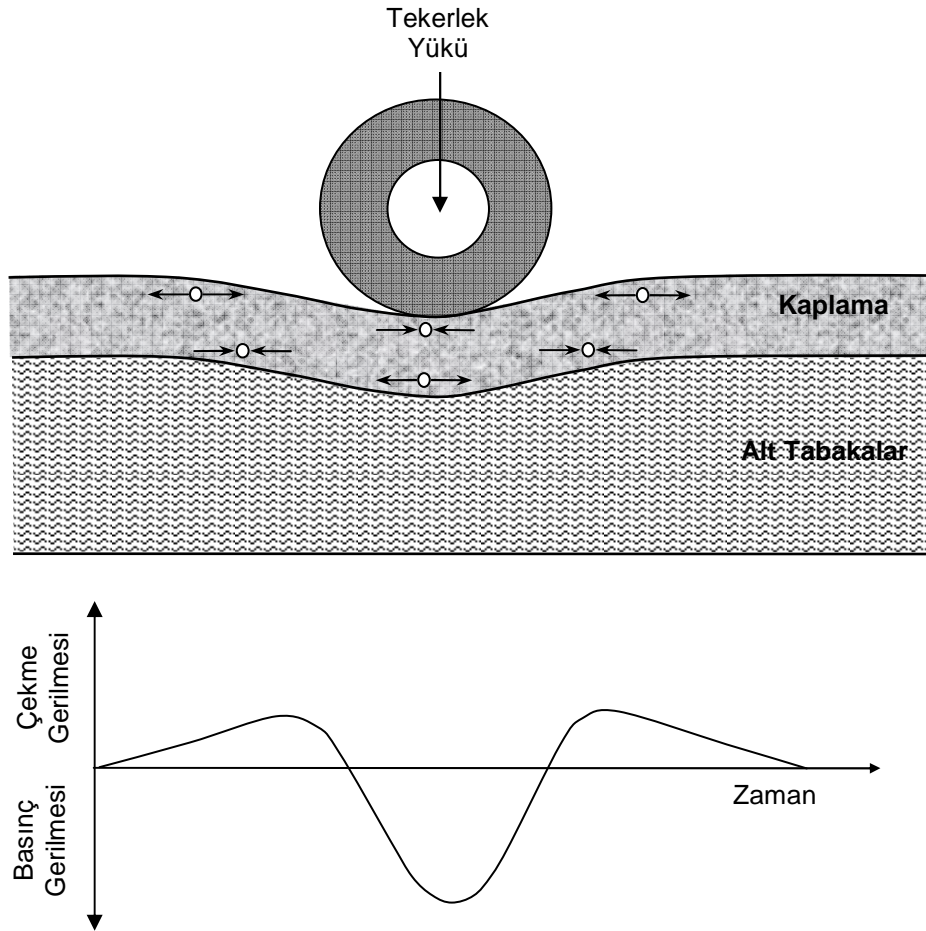
Karayolu üstyapısına gelen yükler, bandajın değme alanı üzerinde ve yayılma şekilleri kesin olarak bilinmeyen tarzda asfalt kaplamaya iletirler. Nizami yüklenmiş bir taşıt için, bandajdan kaplamaya etkiyen en büyük gerilme 690 kPa ($\approx 7 \text{ kg/cm}^2$) civarındadır. Hareketli tekerlek yüklerin etki süresi, hıza bağlı olarak 0,1 ile 0,01 saniye arasında değişir. Yapılan araştırma ve gözlemler, hızlı giden taşıtların yavaş seyreden taşıtlara göre yol yüzeyine daha düşük gerilmeler uyguladıklarını göstermiştir.

Yük altında bulunan bir pnömatik bandajın etkisi ile yol üstyapısı deformasyona uğramaktadır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, bandaj ekseninin altına rastlayan noktada, en büyük deformasyon oluşmaktadır. Bu noktadan itibaren sağa ve sola doğru olan deformasyonlar, bir dairenin eğrilik yarıçapına uyarak küçülmektedir. Üstyapı deformasyonunun bu genel davranışına uygun olarak, tekerleğin hareketi ile kaplama tabakasında oluşan gerilmeler ve gerilmenin zamanla değişimi Şekil 3.2'de görülmektedir. Asfalt kaplamalarda oluşan çekme gerilmesinin yaklaşık 1,5 ile 2 MPa ($15\text{-}20 \text{ kg/cm}^2$) arasında olduğu saptanmıştır [13].

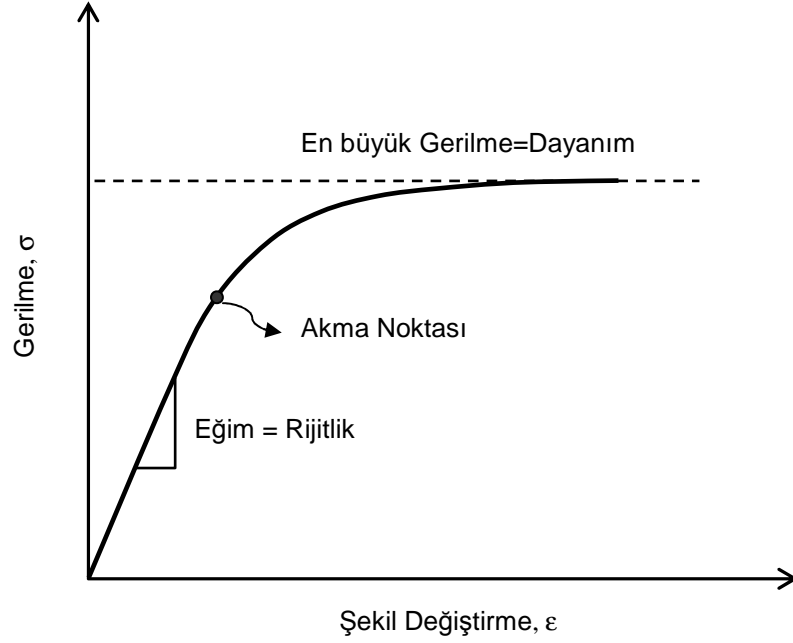
Tipik mühendislik malzemeleri için ideal gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin verildiği Şekil 3.3'teki eğrisinin eğim değişiminin başladığı akma noktası, plastik (geri dönmeyen) ve elastik (geri dönen) şekil değiştirmeyi birbirinden ayırmaktadır. Bu eğrinin doğru kısmının eğimi, rijitlik (elastisite modülü) değerini vermektedir.



Şekil 3.1: Tekerlek Yüğü Altında Üstyapı Yüzeyinin Deformasyonu [13]



Şekil 3.2: Tekerlek Yüğü'nün Kaplama Tabakasında Oluşturduğu Gerilmeler [13]



Şekil 3.3: Tipik Bir Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi

Malzemenin dayanımı, göçme noktasına ulaşmadan taşıyabileceği en büyük gerilme olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü sıcak karışımın dayanımı, farklı yükleme türlerinin kullanıldığı deney aletleri ile belirlenebilmektedir.

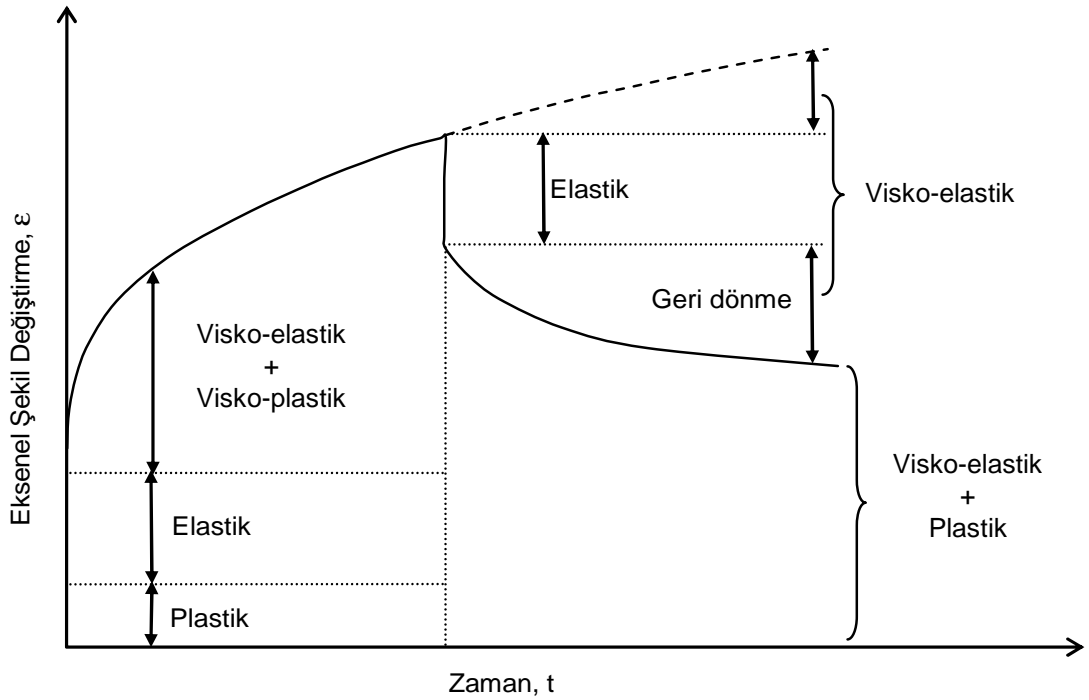
Asfalt kaplamaların rijitlik özelliklerini ifade etmek için, sünme uyumu, rölaksasyon modülü, eğilme rijitliği, dinamik modül ve sünme modülü gibi parametreler kullanılmaktadır. Bunların yanında, malzemelerin nitelendirilmesinde, malzeme boyunca değişik tip dalga hızlarının ölçülmesine dayanan hasarsız değerlendirme tekniklerinden de yararlanılmaktadır. Bu parametrelerden hangisinin kullanılacağı, kaplama modellemesinde gerekli olan bozulma türüne ve servis aşamasındaki sıcaklık koşullarına bağlıdır.

Bitümlü bağlayıcının visko-elastik özelliğinden etkilenen mekanik bir davranış sergileyen bitümlü sıcak karışımlar, kompozit bir malzeme olarak nitelendirilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (<0 °C) asfalt kaplamanın davranışı, yükleme altında küçük kalıcı deformasyonlar olduğu için lineer visko-elastik davranış olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla, düşük sıcaklıklarda bitümlü sıcak karışım, yükleme ve sıcaklık koşullarının değiştirilebildiği dolaylı çekme sünme deneyi gibi kısmen basit bir deney ile nitelendirilebilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların daha çok doğrusal olmayan taneli bir malzeme gibi davrandığı daha yüksek sıcaklıklarda ise, plastik ve visko-plastik davranışını belirlemek için yükleme hızı ve sıcaklık parametrelerinin yanı sıra deviatör gerilme ve yanal basınç değişimlerini de içeren araştırma gerekmektedir [22].

Bitümlü sıcak karışımların davranışının incelenmesinde dinamik kayma reometresinin kullanıldığı çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir [23] :

- 10 °C'den düşük sıcaklıklarda karışımlar, bağlayıcı reolojisini büyük ölçüde yansıtmaktadır.
- 10–50 °C'ler arasında karışım davranışı, bağlayıcının her bir özelliğine karşı duyarlıdır. Bu nedenle, karışımlarda kullanılacak olan bitümlü bağlayıcılarda oluşabilecek dikkate değer farklılıklar azaltılmalıdır.
- 50 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda karışım davranışı, agrega özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bağlayıcı özelliklerinde oluşacak değişiklikler karışımların dinamik-mekanik özelliklerine yansımamaktadır. Yalnızca yüksek düzeydeki modifikasyonlar, karışım davranışında dikkate değer bir etkiye sahiptir.

Bitümlü sıcak karışım şekil değiştirme davranışı; sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olan elastik, plastik, visko-elastik ve visko-plastik şekil değiştirme bileşenlerinden oluşmaktadır. Tekrarlı yükleme altında oluşan şekil değiştirme bileşenleri verilen Şekil 3.4'te elastik ve plastik bileşenlerin zamandan bağımsız, visko-elastik ve visko-plastik bileşenlerin ise zamana bağımlı olduğu görülmektedir. Buradaki visko-elastik bileşen kalıcı deformasyon geçmişini ifade etmektedir. Yüksek yükleme hızları ve yüksek sıcaklıklarda, kalıcı deformasyonların büyük kısmını plastik bileşen oluştururken ve visko-plastik bileşen ihmal edilebilmektedir [24].



Şekil 3.4: Tekrarlı Yüklemede Oluşan Şekil değiştirme Bileşenleri [24]

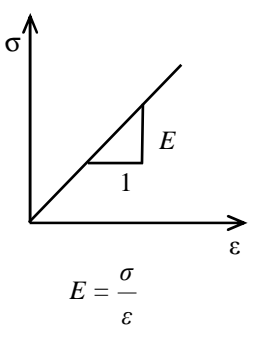
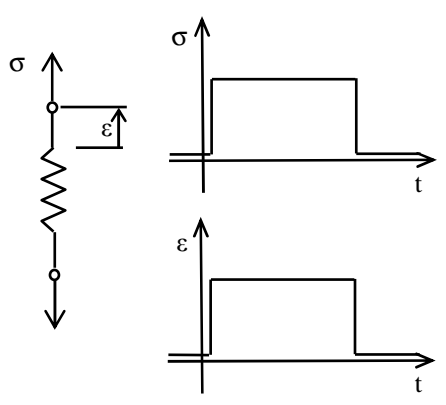
3.1 Mekanik ve Reolojik Malzeme Modelleri

Bu bölümde, malzemelerin mekanik ve reolojik mühendislik uygulamalarında kullanılan fiziksel modeller özetlenmiştir. Mühendislik ve sürekli ortamlar yaklaşımı; katıların mekanik davranışını elastisite kanunlarına, sıvıların reolojik davranışını ise akışkanlar mekaniği ve viskoz akış kanunlarına dayanarak açıklarken, maddenin atomik ve moleküler yapısını göz ardı etmektedir.

3.1.1 Elastik Malzeme Davranışı

Elastik malzemelerde, bir şekil değiştirme artışı sırasında dış gerilmeler tarafından yapılan tüm iş depolanmakta, yüklemeye kalktığı anda ise geri dönmektedir. Bu esnada, malzemede enerji kaybı olmamaktadır. Elastik şekil değiştirmeler yalnızca gerilme büyüklüğüne bağlı, şekil değiştirme ve yüklemeye geçmişine bağlı değildir. Tablo 3.1’de denklemi ve şematik gösterimi verilen Hook kanunu, şekil değiştirmenin uygulanan gerilme ile orantılı olduğunu ifade etmektedir. “Young Sabiti” olarak da isimlendirilen elastik sabit (E), maruz kalınan gerilmenin büyüklüğü ve şekline bağlı değildir [25].

Tablo 3.1: Hook Kanunu ve Lineer-Elastik Model

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$		Zamandan bağımsız	Geri dönebilir

En çok kullanılan elastik parametreler olan ve çapsal gerilmenin sabit (veya sıfır) tutulduğu tek eksenli basınç veya çekme deneylerinden elde edilebilen Young Modülü (E) ve Poisson Oranı (ν) sırasıyla 3.1 ve 3.2 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$E = \frac{d\sigma_d}{d\epsilon_d} \quad (3.1)$$

$$\nu = \frac{d\varepsilon_c}{d\varepsilon_d} \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde,

σ_d : Eksenel (düşey) gerilme

ε_d : Elastik eksenel (düşey) şekil değiştirme

ε_c : Elastik çapsal (radyal) şekil değiştirme

Zemin mekaniğinde basınç veya boyut değişiminden çok kayma veya şekil değişimi daha önemli olduğundan kayma modülü (G) ve hacimsel modül (K), diğer elastik parametreler olan Young modülü (E) ve Poisson oranına (ν) tercih edilmektedir [26].

İzotrop ve elastik malzemeler için birbirinden farklı olan kayma ve hacimsel modüller ile elastik parametreler arasındaki temel bağıntılar 3.3 ve 3.4 nolu eşitliklerde verilmiştir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.4)$$

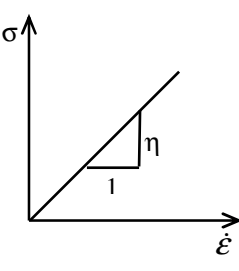
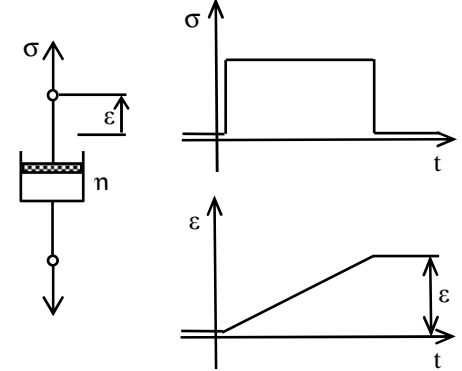
3.1.2 Viskoz Malzeme Davranışı

Newton kanunu, 3.5 nolu eşitlikteki görüldüğü gibi kayma gerilmesi (τ) ile kayma şekil değiştirmesi (γ) arasında doğru orantı olduğunu ifade etmekte ve viskozite olarak adlandırılan bir orantı sabiti (η) tanımlamaktadır.

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (3.5)$$

Tablo 3.2'de bazı özellikleri verilen Newton kanununda, düşük şekil değiştirme oranlarında, Hook kanununa benzer lineer bir ilişki elde edilmektedir. Fakat yüksek şekil değiştirme oranlarında, lineer ilişkiden sapmalar olması beklenmektedir. Kalıcı deformasyonu netice veren akma olayında enerjinin kaybolması gibi, saf Newton viskoz sıvılarında zamanla şekil değiştirme sürekli ve lineer bir şekilde artmaktadır.

Tablo 3.2: Newton Kanunu ve Lineer-Viskoz Model

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
 $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta}$		Zamanla Bağımlı	Geri dönebilme yok

3.1.3 Lineer Visko-Elastik Malzeme Davranışı

Elastik katılar ve viskoz sıvıların şekil değiştirme özellikleri oldukça farklıdır. Elastik davranış gösteren cisimler, uygulanan yükler kaldırıldığında doğal veya şekil değiştirme olmamış ilk durumlarına dönmektedir. Viskoz sıvılar, şekil değiştirme geri dönme eğilimi göstermez. Aynı zamanda bir viskoz sıvıdaki gerilme, şekil değiştirme hızına bağlı iken, elastik gerilme ile şekil değiştirme miktarı arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Elastik ve viskoz davranışı bir araya getiren malzeme davranışı, visko-elastik davranış olarak tanımlanmaktadır. Elastik katı (Hook cismi) ve viskoz sıvı (Newton cismi), visko-elastik davranışın geniş spektrumunun birbirine zıt uç noktalarını temsil eder.

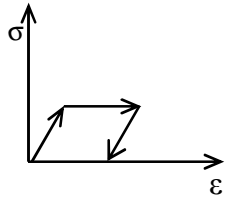
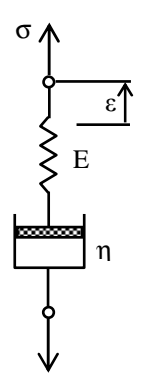
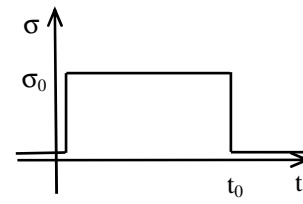
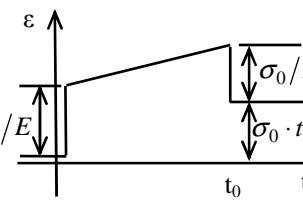
Visko-elastik davranışın anlaşılmasında, sünme ve geri dönme kavramlarının açıklanması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yüklemenin yapıldığı malzemelerde, uygulanan gerilme akma gerilmesinden küçük olmasına rağmen malzeme uzamakta ve sonunda kopmaktadır. Yüksek sıcaklıkta ve sabit gerilme altında meydana gelen şekil değiştirme olayı “sünme” olarak adlandırılmaktadır.

Lineer visko-elastisitede önemli bir diğer özellik, malzemenin kalıtsal hafızaya sahip olmasıdır. Herhangi bir zamandaki şekil değiştirme, o zamana kadar uygulanan gerilme geçmişine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, lineer visko-elastik bir malzeme için, sıcaklık-zaman süperpozisyon prensibi de uygulanabilmektedir.

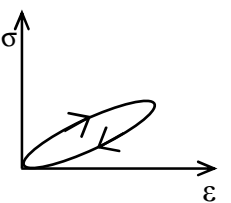
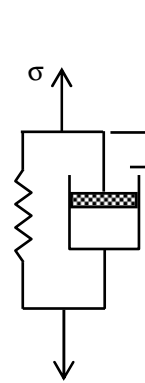
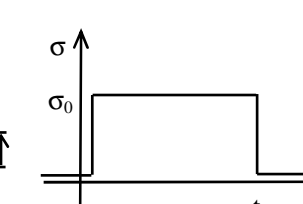
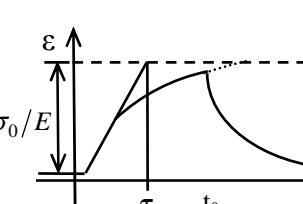
Lineer visko-elastisite, çeşitli visko-elastik malzemelerin şekil değiştirme davranışını ortaya koyan tek boyutlu mekanik modeller ile ifade edilebilmektedir. Elastik modelde yay sabiti E olan kütesiz lineer yay ve viskoz davranışı ifade eden viskozite sabitine (η) sahip viskoz yağ kutusu lineer visko-elastik davranışın mekanik

elemanlarıdır. Visko-elastisitede kullanılan iki temel model, Maxwell ve Kelvin modelleridir. Tablo 3.3'te verilen Maxwell model, seri bağlı bir yay ve yağ kutusundan oluşmaktadır. Tablo 3.4'te görülen Kelvin modelde ise, aynı mekanik elemanlar paralel olarak bir araya gelmektedir. Bitümlü sıcak karışımların visko-elastik yapısını modellemekte yetersiz kalan bu iki model dikkate alınarak geliştirilen modeller arasında, Tablo 3.5'te verilen Burger modeli ve genelleştirilmiş Maxwell modeli yer almaktadır.

Tablo 3.3: Maxwell Modeli (Lineer Visko-Elastik Model)

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
 $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E + \sigma / \eta$	  	Zamanla bağımlı	Geride döner / Geride döner yok

Tablo 3.4: Kelvin Modeli (Lineer Visko-Elastik Model)

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\eta \dot{\varepsilon} + E \varepsilon = \sigma$	  	Zamanla bağımlı	Geride döner

Tablo 3.5: Burger Modeli (Lineer Visko-Elastik Model)

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right]$ $t_0 = \frac{\eta_0}{E_0}$ $t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

3.1.3.1 Sünme ve Rölaksasyon Modülü

Lineer visko-elastik bir malzeme, genellikle düşük ve orta sıcaklıklarda sünme veya rölaksasyon (gevşeme) deneyleri kullanılarak test edilmektedir. Sünme deneyi, visko-elastik bir numunenin sabit bir gerilme (σ_0) altında, zamanın bir fonksiyonu olarak şekil değişirme miktarının $[\varepsilon(t)]$ ölçülmesine dayanır. Sünme deneyinden elde edilen modül değerini ifade etmek için denklem 3.6'daki sünme rijitliği $[S(t)]$ terimi kullanılmaktadır.

$$S(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (3.6)$$

3.7 nolu denklemde verilen sünme uyumu $[D(t)]$, rijitlik teriminin tersidir.

$$D(t) = \frac{1}{S(t)} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3.7)$$

Rölaksasyon deneylerinde, anlık şekil değişirme (ε_0) sabit bir düzeyde devam ederken, zamanın bir fonksiyonu olarak $\sigma(t)$ gerilme rölaksasyonu ölçülmektedir. Rölaksasyon modülü $[E_r(t)]$, 3.8 nolu eşitlikte tanımlanmaktadır.

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (3.8)$$

3.1.3.2 Esneklik Modülü (Resilient Modulus)

Bitümlü malzeme elastik olmamasına rağmen, yükler malzeme dayanımı ile karşılaştırıldığında küçük olduğundan ve büyük tekrar sayılarında uygulandığından, her bir yük uygulamasında oluşan şekil değiştirme yükü orantılı ve tamamına yakını geri dönebilir ve elastik olarak dikkate alınabilir. Huang tarafından kullanılan elastik teoride [27], elastik modül olarak 3.9 nolu eşitlikteki esneklik modülü, M_r tanımlanmıştır.

$$M_r = \frac{\sigma_{dev}}{\epsilon_r} \quad (3.9)$$

σ_{dev} : Deviatör gerilme

ϵ_r : Elastik (geri dönen) şekil değiştirme

3.1.4 Plastik, Elasto-Plastik ve Visko-Plastik Malzeme Davranışı

Kalıcı boyutsal değişime neden olan ve atomik düzeyde bağ bozulmalarından veya kayma mekanizmasından oluşan geri dönmeyen şekil değiştirmeler, plastik şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır [28]. Plastik şekil değiştirmeler, elastik sınır veya akma gerilmesi (σ_a) olarak tanımlanan belirli bir eşik değeri üzerindeki gerilme değerlerinde oluşmaktadır. Akma safhası, devam eden bir plastik şekil değiştirmeyi belirtmek için kullanılmaktadır. Plastik akma, şekil değiştirme hızı ile olduğu kadar şekil değiştirme miktarına da bağlı olabilmektedir. Akma safhasındaki gerilme, malzemenin yükleme ve şekil değiştirme geçmişine bağlıdır. Zamandan bağımsız olan plastik şekil değiştirmeler, sünme ve rölaksasyon gibi birbirinden farklı kavramlar ile açıklanmaktadır.

Akma teorilerine dayanan farklı bünyesel modeller geliştirilmiştir. Akma teorisi, plastik şekil değiştirmenin açıklanmasında akma fonksiyonu, akma kuralı, sertleşme kuralı kavramlarını kullanmaktadır. Akma fonksiyonu, elastik ve plastik malzeme davranışını birbirinden ayırırken; akma kuralı, plastik bölgedeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tanımlamaktadır. Sertleşme kuralı ise, plastik şekil değiştirmeye neden olan akma fonksiyonundaki değişimi tanımlamaktadır.

Rijit ve tam plastik davranış, Tablo 3.6'daki gibi karşılıklı olarak iki plaka veya düzlem üzerindeki bloktan oluşan bir kuru-sürtünmeli model (Saint-Venant Model) ile gösterilebilmektedir. Lineer elastik, tam plastik model Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Malzeme şekil değiştirme sertleşmesine uğrarsa, gerilmedeki artışla plastik şekil değiştirme miktarı artmakta ve malzeme gerilme yumuşaması sergilerse, plastik şekil

değiştirmede azalma oluşmaktadır. Gerilme sertleşmesi, plastik şekil değiştirmeye neden olmakta ve şekil değiştirme yumuşaması ise malzemede kırılmaya neden olmaktadır.

Tablo 3.6: Saint-Venant Cismi (Rijit, Tam-Plastik Model)

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	şekil Değiştirme
Akma Kuralı $\sigma_Y \geq 0$ $\dot{\epsilon} = \begin{cases} 0 \\ \Delta f(\sigma) \end{cases}$ ¹ $\sigma \leq \sigma_Y$ ve $\dot{\sigma} < 0$ ise ² $\sigma = 0$ ve $\dot{\sigma} = 0$ ise		Zamanla bağımlı	Geri dönebilme yok

Tablo 3.7: Linear-Elastik, Tam-Plastik Model

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	şekil Değiştirme
		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

Zamana bağlı olan visko-plastik davranışta, malzemede geri dönmeyen şekil değiştirme oluşmaktadır. Tablo 3.8'de görölen lineer viskoz elemanlı paralel kuru-sürtüneli elemandan oluşan Bingham model, lineer visko-plastik davranışı temsil etmektedir.

Tablo 3.8: Bingham Cismi (Lineer Visko-Plastik Model)

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	şekil Değiştirme
$\sigma_Y \geq 0,$ $\dot{\epsilon} = \begin{cases} 0 \\ \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta} \end{cases}$ ¹ $\sigma > \sigma_Y$ ise ² $\sigma \geq \sigma_Y$ ise		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

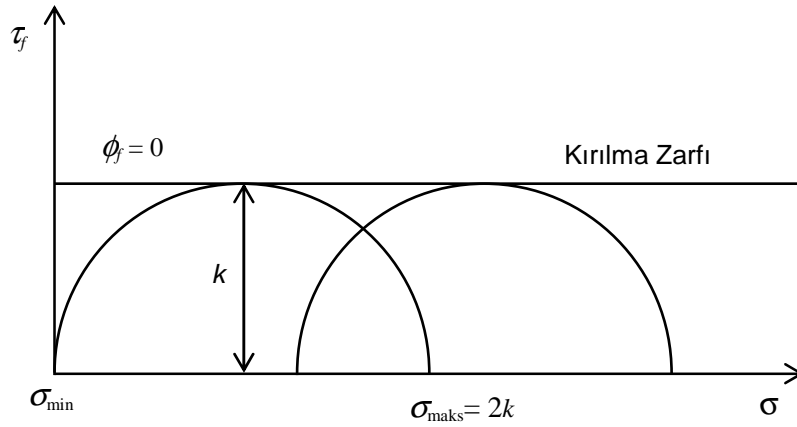
❖ Geoteknik analizlerde kullanılan 3.10 nolu eşitlikteki Tresca akma ölçütü, en büyük kayma gerilmesi $\tau_{maks} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, önceden tanımlanmış “ k ” değerine ulaştığında akma oluşacağını ifade etmektedir [29]. Şekil 3.5’te, tek eksenli basınç durumu için çizilen bir Mohr dairesi ile “ k ” faktörü tanımlanmıştır. Kohezyonlu zemin için ($\phi_f = 0$ durumu):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k \quad (3.10)$$

σ_1 : En büyük asal gerilme

σ_3 : En küçük asal gerilme

$2k$: Tresca sabiti



Şekil 3.5: Tresca Kırılma Zarfı

❖ Von Mises koşulu, 3.11 nolu eşitlikte verilen ikinci deviator gerilme sabiti (J_2) belirli bir değere ulaştığında akmanın oluştuğunu belirtmektedir:

$$J_2 = 3\tau_{okt}^2 = 2\sigma_y \quad \text{veya} \quad \tau_{okt} = \sqrt{\frac{2}{3}\sigma_y} = \sqrt{\frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3.11)$$

τ_{okt} : Oktohedral kayma gerilmesi

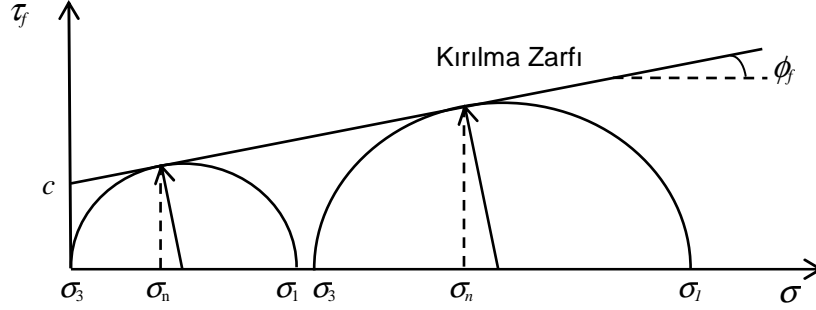
σ_y : Akma gerilmesi

J_2 : İkinci deviator gerilme sabiti

❖ Mohr-Coulomb teorisinde denklem 3.12 ile verilen, kırılma zarfı üzerindeki gerilmeler akma ölçütünü ifade etmektedir (Şekil 3.6).

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (3.12)$$

- σ_1 : En büyük asal gerilme
 σ_3 : En küçük asal gerilme
 c : Kohezyon
 ϕ : İçsel sürtünme açısı



Şekil 3.6: Mohr-Coulomb Kırılma Zarfı

❖ Drucker-Prager kırılma zarfı, ortalama asal gerilme değerinin alındığı Mohr-Coulomb yönteminin üç boyutlu olarak genelleştirilmiş halidir. Kırılma koşulu 3.13'deki eşitlikle tanımlanır.

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k' = 0 \quad (3.13)$$

$$\alpha = \tan \phi_f$$

$$I_1 : \text{Birinci gerilme sabiti} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 : \text{İkinci deviatör gerilme sabiti} = 3/2(\tau_{\text{okt}})^2$$

$$k' : \text{Drucker-Prager kohezyon parametresi}$$

Rijitlik, uygulanan gerilme miktarının oluşan şekil değiştirme miktarına oranını temsil ederken; dayanım, kırılma öncesinde malzemenin dayanabildiği gerilmenin en büyük değeri olarak tanımlanır. Bitümlü sıcak karışımlarda kalıcı deformasyon analizinde birçok yöntem, düşük rijitlik değerleri ile düşük kalıcı deformasyon direnci arasındaki korelasyon nedeniyle rijitlik özelliğine güvenmektedir. Bununla beraber, agraga tanelerinin içsel düzeninde, küçük fakat kalıcı değişimler ile oluşan tekerlek izi için önemli olan karışım dayanımı, daha iyi bir tekerlek izi direnci tahmini sağlar. Rijitlik deneyleri, genellikle küçük şekil değiştirme değerlerinde yürütüldüğünden kalıcı deformasyonların birikmesinden oluşacak daha büyük şekil değiştirmeleri temsil edememektedir. Aynı zamanda, dayanım deneyleri, rijitlik deneylerinden daha basit ve kolay yürütülmekte, bitümlü bağlayıcı ve agraga iskeletinden oluşan bitümlü karışımları daha iyi temsil etmektedir [30].

3.2 Bitümlü Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar

Asfalt kaplamalarda yaygın olarak görülen temel bozulma türleri; kalıcı deformasyon (tekerlek izi), yorulma çatlakları ve termal çatlaklardır. Bu bölümde, yorulma çatlakları ve termal çatlaklardan kısaca bahsedilmiştir. Fakat araştırmanın konusu açısından önemli olan kalıcı deformasyonlar ayrı bir başlık altında daha kapsamlı olarak ele alınmıştır.

Kalıcı deformasyonlar, kaplamaya uygulanan tekrarlı yüklerin bir sonucu olarak, geri dönmeyen küçük şekil değiştirmelerin birikmesi sonucunda oluşur. Kalıcı deformasyon alt temel, temel ve bitümlü sıcak karışım tabakasındaki problemlerden kaynaklanmasına rağmen genellikle kayma kırılmasının olduğu asfalt kaplama tabakasında meydana gelmektedir [31]. Tekerlek izi genellikle, yükleme tekrar sayısının artışıyla gelişmekte ve tekerlek yörüngelerindeki boyuna çökmeler olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.7). Kaplama tabakalarındaki oturma sıkışması ve kayma deformasyonunun birleşmesi sebebi ile oluşan tekerlek izi, bir veya daha çok bitümlü sıcak karışım tabakasında oluşabileceği gibi asfalt kaplama tabakaları altındaki granüler malzemeli tabakalarda da oluşabilmektedir. Tekerlek izinin hacim değişiminden daha çok deformasyon akması sebebiyle olduğu vurgulanmaktadır.



Şekil 3.7: Tekerlek İzi Oluşumunu Gösteren Fotoğraflar

Yorulma çatlakları, Şekil 3.8a'da görüldüğü gibi timsah sırtını andırdığı için timsah sırtı çatlakları olarak isimlendirilmektedir. Yorulma çatlakları, kaplama yapısı için çok ağır yükler ve tasarım için kullanılan daha fazla yükleme tekrarının bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Yetersiz kaplama drenajı anılan bozulma türüne katkı sağlamakta, aşırı nem nedeniyle zayıflayan alt tabakalar bitümlü sıcak karışım tabakalarının büyük şekil değiştirmelere maruz kalmasına ve çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Yorulma çatlaklarının oluşmasında, yapım aşamasındaki kötü

kalite kontrolü ve yetersiz kaplama kalınlıkları önemli etkenler arasındadır [1]. Geçmişte, yorulma çatlaklarının alttan başlayıp yüzeye doğru yayıldığı ve bitümlü sıcak karışımın alt kısmındaki büyük çekme gerilmeleri nedeniyle oluştuğu düşünülmekteydi. Son zamanlarda ise, yorulma çatlaklarının yüzeyden başlayıp, alta doğru yayıldığı gözlenmiştir. Yüzey çatlakları, asfalt kaplamaların yüzeyindeki çekme şekil değiştirmeleri sebebiyle başlamaktadır. Yorulma çatlaklarının, kalınlıkları az olan kaplamalar için bitümlü sıcak kaplama tabakasının altında, kalın kaplamalar için yüzeyde başladığı belirtilmektedir. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışım özelliklerinin kontrol eksikliğinden daha çok yetersiz kaplama yapısı sebebiyle oluşmaktadır.

Asfalt kaplamalarda görülen düşük-sıcaklık çatlakları, sıcaklığın kritik sıcaklıklara düşmesiyle bitümlü sıcak kaplama tabakasında oluşan çekme şekil değiştirmesine bağlanmaktadır. Düşük sıcaklık çatlağı oluşumunda trafik yüklerinden daha çok, düşük kaplama sıcaklıkları rol oynamaktadır. Şekil 3.8b'deki fotoğrafta görülen termal çatlaklar, aralıklı enine çatlaklar (trafik yönüne dik) olarak nitelendirilmektedir [1]. Düşük sıcaklık çatlakları, soğuk havalarda asfalt kaplama tabakası büzülürken ortaya çıkan çekme gerilmelerinin bazı noktalarda kaplamanın çekme dayanımını aşması sebebiyle meydana gelmektedir. Düşük sıcaklık çatlakları da yorulma çatlaklarına benzer şekilde, soğuk hava tekrarının toplam etkisinin bir sonucudur. Düşük sıcaklıkların frekansı ve büyüklüğü ile yüzeydeki asfalt kaplamaların rijitliği ve yoğunluğu, düşük-sıcaklık (enine) çatlaklarının oluşumunda ana faktörlerdir. Bu çatlaklar kaplama yüzeyinde başlamakta ve aşağıya doğru yayılmaktadır. Bitümlü bağlayıcı özelliğiyle yakından alakalı olan karışım rijitliği, düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumunda en önemli etkidir.



(a)

(b)

Şekil 3.8: Kaplamada Oluşan Çatlak Türleri: (a)Yorulma Çatlakları
(b) Düşük Sıcaklık Çatlağı

3.3 Kalıcı Deformasyonlar

Bitümlü karışımların deformasyon davranışının anlaşılabilmesi, kaplamalarda en çok görülen bozulma türlerinden biri olan tekerlek izi oluşumunun (kalıcı deformasyon) irdelenmesiyle mümkün olacaktır. Yukarıda kısaca değinilen kalıcı deformasyonlar, sıcak iklimlerde ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda daha sık rastlanan, seyir güvenliği ve sürüş konforunu olumsuz yönde etkileyen bir bozulma türüdür. Yapılan çalışmada, bitümlü karışımların kalıcı deformasyon davranışı incelendiğinden, bu bölümde kalıcı deformasyonun oluşum mekanizması, etkileyen faktörler, belirlenmesinde kullanılan deney tipleri ve tekerlek izi miktarının tahmininde kullanılan modeller irdelenmiştir.

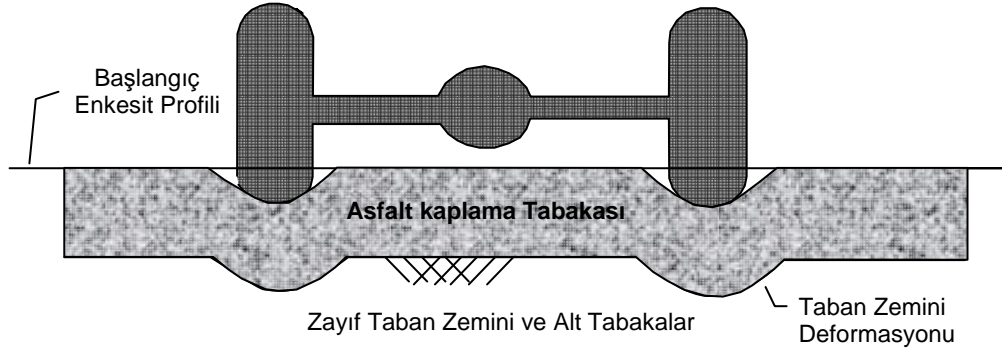
3.3.1 Kalıcı Deformasyon Oluşum Mekanizması

Bitümlü sıcak karışımın davranışı, karışımı oluşturan malzeme özelliklerinin önemli olması yanında, bitümlü bağlayıcı ve mineral agrega bir sistem olarak dikkate alındığında en iyi şekilde açıklanmaktadır.

Kalıcı deformasyon, kaplamanın farklı zamanlarda maruz kaldığı yüklerin kaplama enkesitinde oluşturduğu, küçük miktarlardaki plastik deformasyonların birikmesiyle oluşan bir bozulmadır. Tekerlek izi oluşumu, asfalt kaplamaların temelini oluşturan tabakaların su hasarı, aşınma ve trafik yoğunluğuyla zayıflaması gibi daha birçok nedene bağlanmasına karşılık iki ana sebebi mevcuttur:

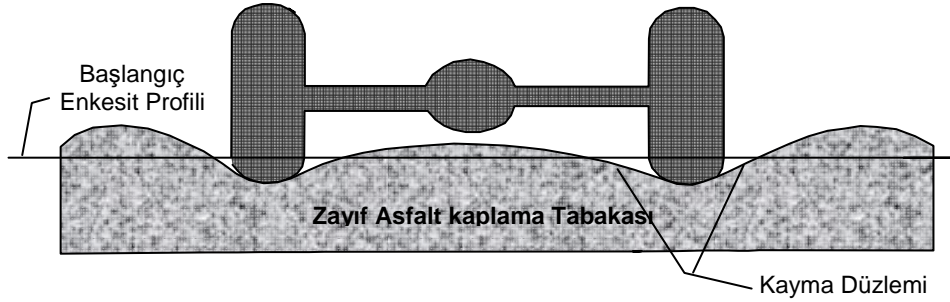
Birinci sebep, asfalt kaplama tabakası altındaki temel, alt temel ve taban zeminine çok fazla tekrarlı gerilmelerin uygulanmasıdır (Şekil 3.9). Bu durum, suyun girmesiyle taban zemininin beklenmeyen bir şekilde zayıflaması sonucu da ortaya çıkabilmektedir. Daha dayanıklı kaplama malzemeleri bu tür tekerlek izini azaltmasına karşılık, normalde bu olay bir malzeme probleminden daha çok, yapısal bir problem olarak dikkate alınmalıdır.

Yapısal tekerlek izi olarak adlandırılan bu durum, çoğunlukla kaplama kalınlığının yetersiz kalması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Çünkü kaplama tabakaları, uygulanan yüklerden oluşan gerilmelerin, taban zemininin taşıyabileceği düzeye düşürerek aktarılmasını sağlayacak yeterli kalınlık ve özellikte olmalıdır. Yapısal tekerlek izinde, toplam deformasyon (deformasyon yığılması) taban zemini içerisinde oluşmakta, bu deformasyonlar asfalt kaplama tabakalarına yansımaktadır.



Şekil 3.9: Düşük Taşıma Kapasiteli Taban Zeminine Bağlı Tekerlek İzi Oluşumu

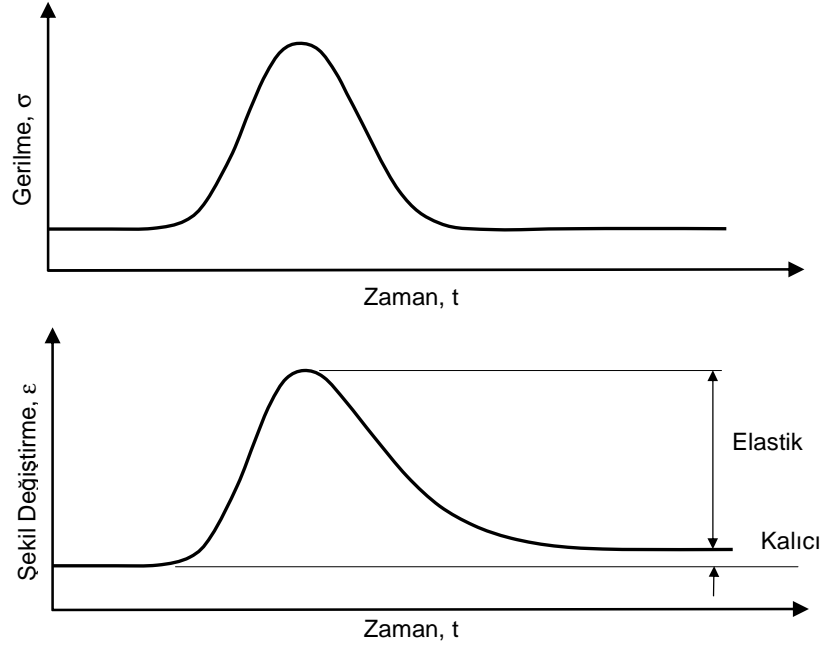
Diğer tekerlek izi türü ise, asfalt kaplama tabakaları içinde birikmiş deformasyonlar sonucunda oluşmakta ve akma tekerlek izi olarak isimlendirilmektedir. Akma tekerlek izi, tekrarlı ağır yüklere maruz kalan ve kayma mukavemeti direnci çok düşük bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelmektedir (Şekil 3.10). Bu tür tekerlek izleri, bazen zayıf aşınma tabakasında oluşur. Bazen de, aşınma tabakası tekerlek izi oluşumuna eğilimli olmasa da alttaki zayıf olan bitümlü tabakaya (binder tabakası) uyum gösterebilir.



Şekil 3.10: Zayıf Asfalt Kaplama Tabakasına Bağlı Tekerlek İzi Oluşumu

Asfalt kaplama tabakasında tekerlek izi oluşması, bitümlü sıcak karışımın kötü bir kayma direncine sahip olduğunun kanıtıdır. Ağır taşıtların her bir geçişinde kaplamaya uyguladığı yük sebebiyle, küçük fakat kalıcı kayma deformasyonları (plastik deformasyonlar) oluşmaktadır. Bu deformasyonların birikimi sonucunda, kaplama tabakasında tekerlek izi meydana gelmektedir (Şekil 3.11).

Bitümlü sıcak kaplama tabakası içindeki kalıcı deformasyonların oluşumunda iki tür mekanik davranıştan söz edilmektedir: Viskoz akma ve plastik deformasyon. Plastik deformasyon, agrega parçalarını bağlayan bitüm içerisindeki viskoz akma sebebi ile agrega tanelerinin birbiri üzerinden yavaşça kayması olarak tanımlanmaktadır. Bu olayın kavramsal olarak açıklanması basit görünmesine rağmen, niceliksel analizi oldukça zordur.



Şekil 3.11: Hareketli Tekerlek Yükü Altında Oluşan Visko-Elastik Davranış

Bitümlü karışımı oluşturan agrega ve bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyon direncine etkilerini ifade etmekte 3.14 eşitliğinde verilen Mohr-Coulomb denklemi kullanılabilir [30].

$$\tau_{maks} = c + \sigma_d \times \tan \phi \quad (3.14)$$

τ_{maks} : Kayma gerilmesi

c : Kohezyon

σ_d : Normal Gerilme

ϕ : İçsel sürtünme açısı

Bu teori, gerilme deneylerinin analizinde, yanal gerilme ve kırılma gerilmesi arasındaki bağıntıyı matematiksel olarak temsil eden basit bir yöntemdir. İçsel sürtünme açısı (ϕ), agrega parçaları arasındaki etkileşimi belirleyen önemli bir parametredir. Bitümlü karışımlar ile ilgili birçok mühendislik uygulamalarında, içsel sürtünme açısının yüksek bir değerde olması istenilir. Kötü bir içsel sürtünme açısı değerine sahip olan agreganın kullanıldığı bir bitümlü karışım, kalıcı deformasyon oluşumuna karşı daha hassastır. Kohezyon (c), teorik olarak sıfır yanal basınçtaki kayma mukavemetini temsil eder. Bir bitümlü karışımda, agregaları birbirine bağlayan bağlayıcının gücünü belirleyen kohezyon parametresi, bağlayıcı içeriği, bağlayıcı sertliği ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.

3.3.2 Kalıcı Deformasyon Direncini Etkileyen Faktörler

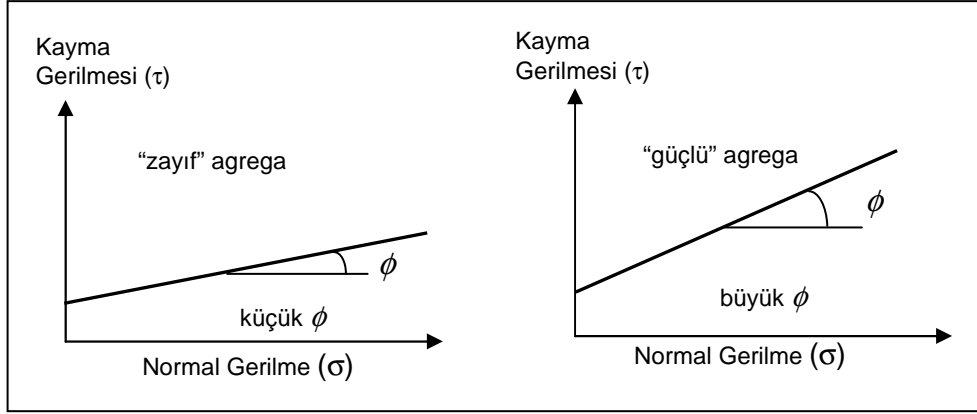
Bitümlü karışımların kalıcı deformasyona karşı direncini saptamak için malzemenin düşük rijitlik davranışı, yani yüksek sıcaklıkta ve uzun yükleme süresindeki davranışı incelenmelidir. Bu koşullarda BSK davranışı elastik bölgeye göre çok daha karmaşıktır. BSK'ın visko-plastik davranış malzemelerin hacimsel yüzdeleri yanında, agreganın tane dağılımı, biçimi, dokusu ve kenetlenmesi ile sıkıştırma yöntem ve derecesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Kalıcı deformasyon direncini etkileyen parametreler, agreganın özellikleri, bitümlü bağlayıcı özellikleri, karışım özellikleri, çevresel ve trafik koşulları olarak dört ana başlıkta toplanabilir. Önceki çalışmalara dayanarak hazırlanan Tablo 3.9'da her bir grup ile ilgili parametre değişiminin kalıcı deformasyon direncini ne yönde etkilediği belirtilmiştir.

Tablo 3.9: Kalıcı Deformasyon Direncini Etkileyen Parametreler

	Faktörler	Faktördeki Değişim	Kalıcı Deformasyon Direnci
Agrega	Yüzey Özellikleri	Pürüzlülük arttıkça	Artar
	Tane Dağılımı	Kesikli tane dağılımından Sürekli tane dağılımına doğru	Artar
	Şekil	Yuvarlaktan köşeli agregaya	Artar
	Boyut	En büyük boyut arttıkça	Artar
Bitümlü Bağlayıcı	Sertlik	Artıkça	Artar
	Karışımındaki Yüzdesi	Artıkça	Azalı
Karışım	Boşluk Yüzdesi	Artıkça	Azalı
	VMA	Artıkça	Azalı
	Sıkıştırma Yöntemi	-	-
Trafik ve Çevresel Koşullar	Sıcaklık	Artıkça	Azalı
	Gerilme-Şekil Değiştirme Durumu	Lastik değme basıncı arttıkça	Azalı
	Yükleme tekrarı	Artıkça	Azalı
	Su	Kuru ortamdan nemli-ıslak ortama geçildikçe	Eğer karışımın nem duyarlılığı yüksekse, azalı

3.3.2.1 Agreganın Özellikleri

Bitümlü karışımın kayma mukavemetinin artırılmasında en etkili yöntem, yüksek içsel sürtünme açısına (ϕ) sahip agreganın seçimidir. Bu, agregalar arasındaki kenetlenmeyi iyi biçimde sağlayacak tane dağılımına ve pürüzlü yüzey yapısına sahip, kübik bir agreganın seçimiyle sağlanabilir. Şekil 3.12'de agreganın genel olarak karışımın kayma mukavemetine katkısı görülmektedir.



Şekil 3.12: Agreganın Karışımın Kayma Mukavemetine Katkısı [1]

Karışım içerisindeki agregalara yük uygulandığında, agreganın parçaları sıkıca birbirine kenetlenmekte ve tekil parçaların bir kümesi olarak değil, tek ve elastik bir taş gibi davranmaktadır. Böylelikle, lastik bant gibi hareket eden bitümlü karışım yük kaldırıldığında ilk haline geri dönecek ve kaplamada deformasyon birikmesi olmayacaktır. Agreganın tane dağılımı, kalıcı deformasyon direncinde ve karışım tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir etkidir. Fakat tane dağılımının etkisinin ifade edilmesinde güçlük çekilmektedir. Son zamanlarda araştırmacılar tane dağılımının etkisinin ifade edilmesinde “tane dağılımı indeksi” kavramını kullanmışlardır. Agreganın tane dağılımı indeksi kavramı ve agreganın özelliklerinin kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

❖ Agreganın Tane Dağılımı İndeksi

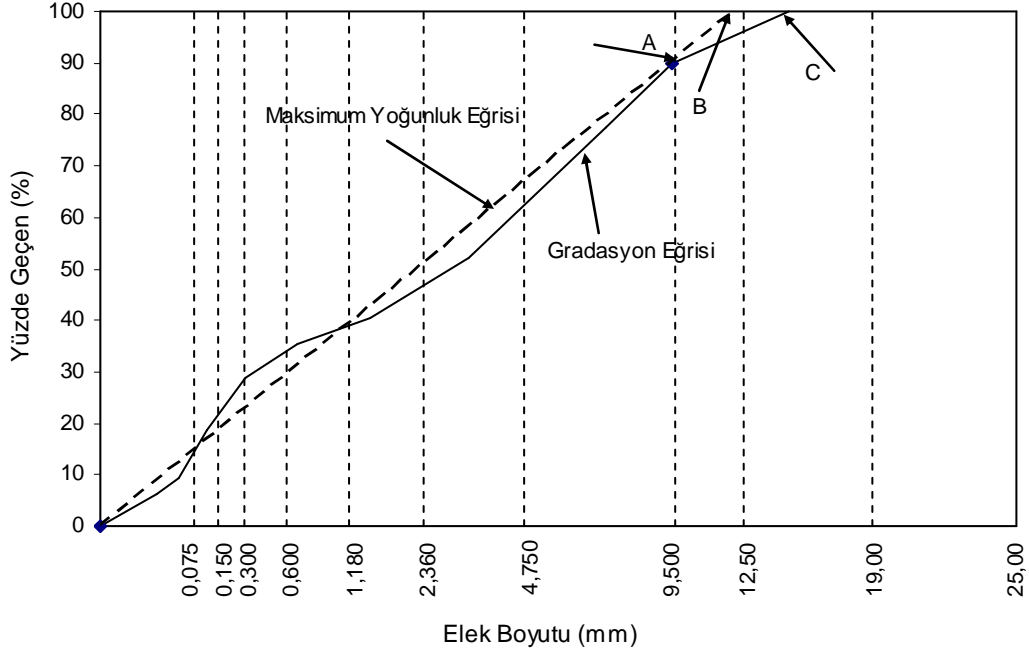
Superpave tasarım yönteminde uygun agreganın tane dağılımını belirlemek için 0.45’inci kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu grafikte dikey eksen yüzde geçeni, yatay eksen aritmetik ölçekte elek boyutlarının 0.45’inci kuvvetini göstermektedir. Bu grafikte tanımlanan maksimum yoğunluk eğrisine yakın tane dağılımları, durabilite için gerekli olan yeterli bitüm miktarını sağlayan VMA değerinden yoksundur. Bu karışımlar bitüm yüzdesi değişimlerine karşı hassastır ve bitüm miktarının çok küçük değişimlerinde bile kolaylıkla plastik hale gelebilir. Bitümlü karışım içindeki bitümle kaplanmış agreganın özellikleri hem agreganın yüzey özellikleri hem de tane dağılımlarıyla alakalıdır. Adezyon ve durabilite için gerekli bitüm film kalınlığı sağlanmasında yeterli boşluğa gereksinim duyulmaktadır. Agreganın taneleri arasındaki boşluk alanının (VMA) oluşumunda agreganın tane dağılımı büyük bir etkiye sahiptir.

Superpave tane dağılımı grafiği Goode ve Lufsay tarafından geliştirilmiştir [32]. Bu grafiğin özelliği maksimum yoğunluk sahip tane dağılımını göstermesidir. En büyük

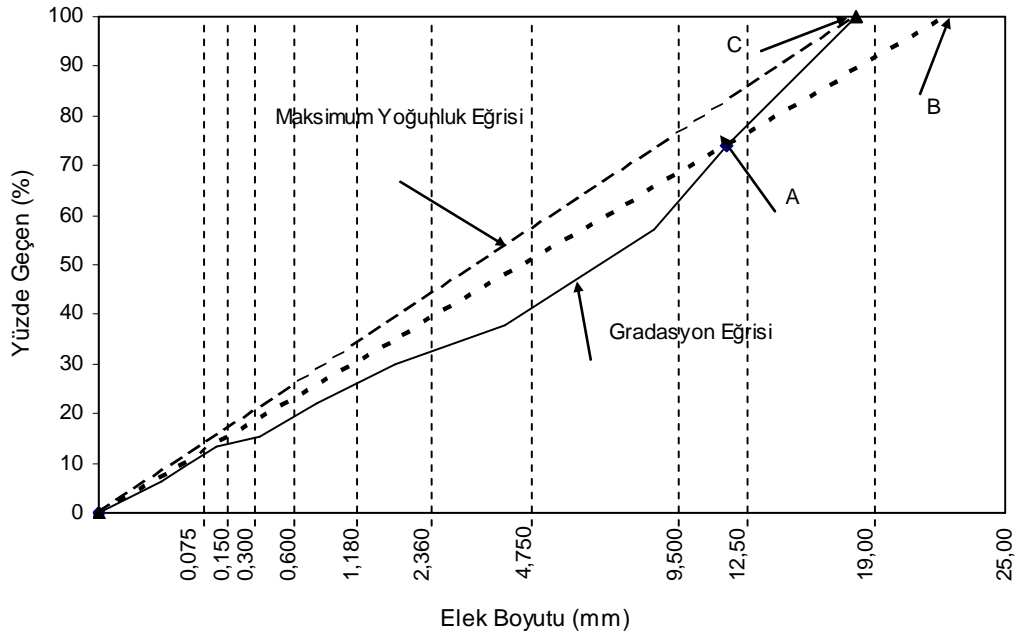
agrega boyutundan başlangıç noktasına çizilen doğru maksimum yoğunluk doğrusunu tanımlamaktadır. Bu grafik, sıkıştırılan karışımlarda istenilen VMA değerini sağlamak için bir araç olarak oluşturulmuştur. Maksimum yoğunluğa sahip tane dağılımında hazırlanan karışımların en küçük VMA değerine sahip olacağı bilinmektedir. Bu karışımlar genellikle, agregalar arası bir kenetlenme sağladığından iyi bir stabilite ve kalıcı deformasyon direnci gösterdiği belirtilmektedir. Fakat bu VMA değeri, kaplama durabilitesi için gerekli bitüm miktarını sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla karışım tasarımı kalıcı deformasyon ile yorulma direnci arasında bir uzlaşmayı gerektirdiğinden agrega tane dağılımları genellikle maksimum yoğunluk çizgilerini takip etmemektedir. Bununla beraber diğer bir kanıda, maksimum yoğunluk çizgisinden elde edilen bir karışımın kalıcı deformasyon oluşumuna daha duyarlı olduğudur [32]. Verilen bir tane dağılımı için çizilen maksimum yoğunluk eğrisinin en büyük agrega boyutunun seçimi için rehber bir çizgi oluşturmadığıdır. En büyük agrega boyutunun tanımlanması, maksimum yoğunluk eğrisinin eğiminin ve verilen tane dağılımından sapmaların belirlenmesinde oldukça önemlidir. Fakat en büyük agrega boyutunun nasıl tanımlanacağı hususunda bir fikir birliği yoktur. Superpave karışım tasarım sisteminde, nominal agrega boyutu agreganın %10'undan fazlasının üzerinde kaldığı elek boyutudur. Nominal agrega boyutundan bir derece büyük elek açıklığı en büyük agrega boyutu olarak isimlendirilir. Bu tarifler, agrega tane dağılımının maksimum yoğunluk eğrisinden olan mesafelerinin toplamıyla VMA arasında en iyi korelasyonu bulan Huber ve Shuler'in çalışma sonuçlarına dayanmaktadır [33].

Bazı araştırmacılar maksimum yoğunluk çizgisi tarifini farklı yöntemlerle inceledikleri halde bir sonuca ulaşamamışlardır. Archilla ve Samer yaptıkları çalışmada, yukarıda anlatılanlar ışığında, grafiği geliştirenler tarafından kullanılan yöntemine uygun olarak yeni bir maksimum yoğunluk eğrisi tanımlamışlardır [34]. Bu tanıma göre, ilk olarak %100'ün geçtiği en küçük elekten bir küçük boy eleğe karşılık gelen bir A noktası tane dağılımı eğrisi üzerinde belirlenir. Daha sonra, orijinden A noktasına düz bir çizgi çizilir ve bu çizgi yatay çizgiyi kesene kadar uzatılır. Çizginin kestiği nokta B noktası olarak belirlenir (Şekil 3.13). Eğer B noktası %100 geçen en küçük eleğin solunda kaldıysa, maksimum yoğunluk çizgisi olarak orijinden B noktasına gelen çizgi kullanılır. Aksi takdirde, orijinden C noktasına maksimum yoğunluk çizgisi çizilir (Şekil 3.14). Bu maksimum yoğunluk çizgisinin çizimi gerçek en büyük agrega boyutuna her zaman göreceli olarak yakın olan en büyük agrega boyutunu tanımlamaktadır. Bu çizgi Superpave'de tanımlanan maksimum yoğunluk çizgisinin biraz solunda kalmaktadır. Bu tanım, Goode ve Lufsey'in çalışmasıyla da uyumaktadır. Onlarda, en küçük VMA değerinin elde edildiği tane dağılımının biraz solundaki tane dağılımları için en büyük stabilite

değeri bulmuşlardır. Bu sonuç, seçilen tane dağılımlarının maksimum yoğunluk çizgisinden uzak olmasının daha az agrega kenetlenmesi ve kalıcı deformasyon direncine sahip olacağını gösterir. Yukarıda tanımlanan maksimum yoğunluk eğrisine yakınlığın bir ölçüsü olan Tane Dağılımı İndeksi (Gradation Indeks-GI), seçilen tane dağılımı eğrisi ve maksimum yoğunluk çizgisinin aynı eleklerle karşılık gelen % geçen miktarları arasındaki farkların kareleri toplamının 1/100 katıdır. Belirtilen tarzda hesaplanan tane dağılımı indekslerinin, agrega tane dağılımının kalıcı deformasyon duyarlılığına etkisini iyi bir şekilde nitelendirdiği görülmektedir.



Şekil 3.13: Birinci Durum için Çizilen Maksimum Yoğunluk Eğrisi [34]



Şekil 3.14: İkinci Durum için Çizilen Maksimum Yoğunluk Eğrisi [34]

❖ Roque ve diğ., bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi direncine en etkili faktörün belirlenmesi için, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm ve 2,0 mm' lik eleklerden toplam yüzde geçen olarak belirtilen 18 farklı kaba agrega tane dağılımını incelemiştirler [35]. Bu çalışmada, yoğurmalı pres kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin sıkıştırma sırasında kayma moment değerleri belirlenmiştir. #4 eleği üzerinde kalan agrega yüzdesindeki değişimlerin karışımların kayma deformasyon direnci üzerinde çok daha etkili olduğu bulunmuştur. En büyük agrega boyutundaki değişimin, bitümlü sıcak karışımların kayma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı gösterilmiştir. Kayma direnci üzerindeki en etkili faktörün 0,45'inci kuvvet eğrisine uygun olarak çizilen tane dağılımı eğrisinin “eğimi” olduğu belirtilmiştir. 4,75 mm boyutlu elek üzerindeki tane dağılımı eğrisinin eğimi, kalıcı deformasyon üzerinde daha etkilidir. Bu çalışma sonucunda, iri agrega yüzdesinin kalıcı deformasyon üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

❖ Oregon eyaletinde yaygın olarak kullanılan bitüm-agrega karışımların tekerlek izi potansiyelinin değerlendirildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir [36]. Bu çalışmada, dört farklı bitümlü sıcak karışım tipi incelenmiştir. Bunlar, 38 mm en büyük nominal agrega boyutunda büyük agregalar içeren karışım, trafik hacmi yüksek yollarda uygulanan 19 mm en büyük nominal agrega boyutunda yoğun tane dağılımlı karışım, özel uygulamalarda kullanılan 12,5 mm en büyük nominal agrega boyutunda yoğun tane dağılımlı karışım ve 19 mm en büyük nominal agrega boyutunda açık tane dağılımlı karışımlardır. Kıрма taş ve çakıldan harmanlanan her bir tane dağılımı Fransız LCPC tekerlek izi aletinde test edilmiştir. 19 mm yoğun tane dağılımlı karışım en iyi performansı sergilemiştir. 38 mm boyutunda agregalar içeren karışım da iyi bir performans göstermiştir. Açık tane dağılımlı karışımlar, arazi uygulamalarının tersine kötü bir performans sergilemiştir. Tekerlek izi direncini etkileyen en etkili faktör, agrega türüdür. Kırmataş agreganın kullanıldığı bitümlü sıcak karışımlar, çakıllı karışımlardan daha az kalıcı deformasyon potansiyeli ve tekerlek izi derinliğine sahiptir. Bitümlü sıcak karışımların boşluk miktarı, yaygın olarak kabul gören fikrin tersine, tekerlek izi potansiyeli üzerinde yok denebilecek kadar az bir etkiye sahiptir.

❖ Agrega tane dağılımının tekerlek izi performansı üzerindeki etkisini inceleyen Matthews ve Monismith, orta dereceli tane dağılımına sahip karışımların, kaba dereceli karışımlardan daha iyi performans sergilediğini vurgulamışlardır [37]. Yoğun tane dağılımlı karışımlar için, kalıcı deformasyon miktarının azalmasında etkili olan kayma direncini sağlamak için agrega taneleri arasındaki kenetlenmenin iyi olmasının gerektiği ve yüksek ince malzeme yüzdesinin agregalar arasındaki kenetlenmeyi azaltarak karışımlardaki tekerlek izini arttırdığını vurgulamaktadırlar.

Agrega kilitlenmesinin sağlanamadığı geçirimli karışımlar gibi bazı karışımlarda kayma direnci bitümlü bağlayıcı tarafından karşılandığı belirtilmektedir.

❖ Carpenter ve diğ., İllionis eyaletindeki otuz iki projeden elde edilen verileri, tekerlek izi direncini etkileyen faktörlerin incelenmesinde kullanmıştır [38]. Bu kesimlerdeki en büyük tekerlek izi problemi agregata tane dağılımına bağlanmıştır. Tekerlek izi oluşumu görülen kesimlerde, tane dağılımı için 0,45'inci kuvvet grafiği çizildiğinde, #40 ve #80 elekleri civarında tane dağılımı eğrisinin bir kamburluğa sahip olduğu görülmüştür. Özellikle #40 elekten geçen ve #80 elek üzerinde kalan malzeme miktarının tekerlek izi potansiyeli üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Esneklik modülü ve dolaylı çekme dayanımı değerlerinin tekerlek izi potansiyeli ile korelasyon içerisinde olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, tekerlek izi etkilerinin azaltılması için arazideki hava boşluğu ve VMA değerlerinin kontrol altında tutulmasını önermektedirler.

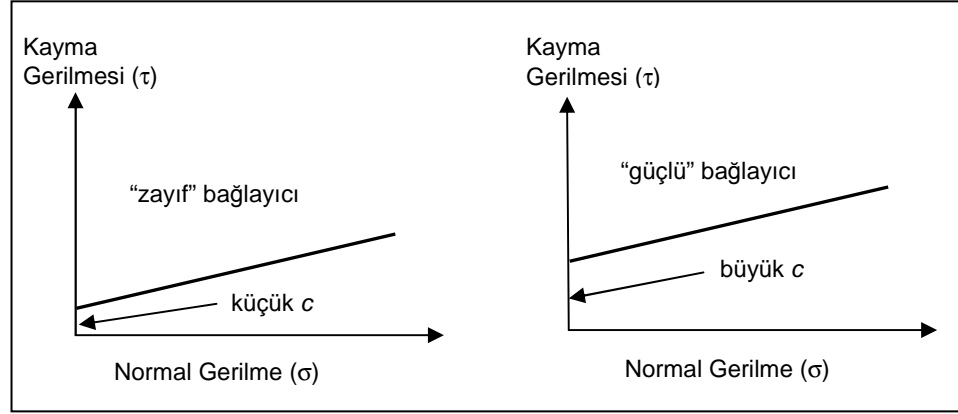
❖ Kim ve diğ., agregata türü, tane dağılımı, bitüm yüzdesi, sıcaklık ve gerilme düzeyinin kalıcı deformasyon üzerindeki etkilerini ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri tek eksenli sünme deneyi kullanarak araştırmışlardır [39]. Varyans analizleri (ANOVA) testleri sonucunda tekerlek izi davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan ana faktörlerin agregata türü ve tane dağılımı olduğu belirlenmiştir. Bu iki ana değişken ve diğer değişkenler arasındaki etkileşimin araştırılmasında, agregata türü ve tane dağılımı, agregata türü ve bitüm cinsi, agregata türü ve boşluk yüzdesi, agregata türü ve sıcaklık arasındaki ilişkilerin önemli olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, düşük bağlayıcı viskoziteli karışımların daha büyük deformasyon eğiliminde olduğunu vurgulamaktadır.

❖ Karakouzian ve diğ., kaplama yapısı, alt temel özellikleri ve trafik hacmi benzer dört projede tekerlek izi verileri üzerinde çalışmışlardır [40]. Bu projelerdeki ana değişkenler, bağlayıcı türü ve tane dağılımı eğrisinin şekli (sürekli kaba tane dağılımından kesikli kaba tane dağılımına kadar) olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, en büyük agregata boyutu ve 4,75 mm elek arasındaki tane dağılımı eğrisi maksimum yoğunluk eğrisinin eğiminden ne kadar dikse tekerlek izi direncinin o kadar yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum yoğunluk eğrisinden daha düşük eğimli bir tane dağılımı eğrisi için iri agregata tanelerinin bitüm matrisi (bitüm-ince agregata-filler) içerisinde yüzdüğü, dolayısıyla tane-tane etkileşimi sağlanamayan karışımların tekerlek izi direncinin düşük olduğu vurgulanmaktadır. Araştırmacılar, agregata filleri ve bitümlü bağlayıcının bitümlü sıcak karışımların taşıma kapasitesinde önemli bir etkiye sahip olmadığını da belirtmektedir.

3.3.2.2 Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri

Karışımın kalıcı deformasyona direncini büyük oranda etkileyen parametre agrega olarak bilinmesine karşılık, bitümlü bağlayıcının etkisi de çok önemlidir. Reolojisine ve sıcaklığa bağlı olarak kayma direnci düşük bağlayıcılar, kohezyonu ve bir dereceye kadar sınırlandırılmış “normal” gerilmeyi azaltmaktadır. Böylece karışım daha çok çözülmüş bir agrega kütleleri olarak davranmaya başlamaktadır.

Tekerlek izi oluşumu çok küçük kalıcı deformasyonların birikmesi sonucunda oluşmaktadır. Karışımın yeterli kayma mukavemetinin sağlanabilmesi için yüksek kaplama sıcaklıklarında elastik bir katı gibi davranan bitümlü bağlayıcı kullanmak gerekir (Şekil 3.15). Böylelikle, kaplamaya bir yük uygulandığı zaman karışımdaki bitümlü bağlayıcı daha çok, lastik bir bant gibi davranacak ve şekil değiştirmiş biçimde kalmak yerine ilk durumuna geri dönecektir.



Şekil 3.15: Bitümlü Bağlayıcının Karışımın Kayma Mukavemetine Katkısı [1]

Superpave yönteminde, bitümlü bağlayıcı sınıfları (dereceleri), bozulma göstermeksizin yeterli performansı sağladığı sıcaklık aralıklarına göre belirtilmektedir. Tipik olarak daha sert (rijit) bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans sergilemektedir. Kalıcı deformasyon göstermeksizin, ağır taşıt yüklerine ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı karışımların üretilmesinde yüksek sertliğe sahip bitümlü bağlayıcıların kullanılması istenmektedir. Düşük penetrasyonlu ve yüksek viskozite değerli bağlayıcılar daha iyi tekerlek izi direnci sağlamaktadır. Konvansiyonel bağlayıcılar hem yüksek hem de düşük kaplama sıcaklıklarında daha iyi performans sağlamak için modifiye edilebilmektedir [1].

Bitümlü bağlayıcıların penetrasyon dereceleri aynı olsa da, orijinine ve rafineride gördüğü işleme göre yumuşama noktası ve sıcaklık duyarlılığı gibi tekerlek izi direncinde önemli olan başlıca reolojik özellikleri farklılıklar göstermektedir.

Ham petrolün işlevsel olarak damıtılması sonucunda elde edilen kalıntılar (short residue) 20 farklı bitüm cinsinin hammaddesidir. Bu kalıntının viskozitesi, hem petrolün çıkarıldığı kaynağın hem de işlem sırasında vakum kolonunda uygulanan sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonudur. Ham petrolün kaynağına bağlı olarak kolon içerisindeki koşullar 100 ila 300 penetrasyonlu kalıntı üretmek için uygulanır. Ön ısıtma yapılarak hava ile işleme tutulan kalıntılar oksijeni bünyesine almaktadır.

Oksitlendirilmiş bitümün “penetrasyon ve yumuşama noktası”, hammaddenin viskozitesi, oksitlendirme kolonundaki sıcaklık ve kalma süresi, hammaddenin üretimi için kullanılan ham petrolün kaynağı, hava oranı/hammadde gibi etkenlere bağlıdır. Damıtma ve üfleme işlemlerinin ikisinde de yumuşama noktası yükselirken penetrasyon değeri düşmektedir.

Yol inşaatına uygun penetrasyona sahip bitümler üretmek için, bazı tür malzemenin sınırlı bir oksitlendirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu işleme yarı oksitlendirme veya hava düzeltmesi isimleri verilmektedir. Akıllıca kullanıldığında yarı oksitlendirme işlemi bitümün sıcaklık duyarlılığını azaltmak diğer bir deyişle penetrasyon indeksini yükseltmek için kullanılır. Hammaddenin viskozitesi ve kolon içindeki koşullar kontrol edilerek her sınıf bitüm imal edilebilmektedir.

Termoplastik özellik gösteren bitümlü bağlayıcılar ısıtıldıklarında yumuşar soğutulduklarında sertleşirler. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığı, bitümlü bağlayıcının kıvamının sıcaklıkla değişme özelliğidir. Viskozitenin (ya da kıvamın) sıcaklıkla değişimini tanımlamak amacıyla çeşitli ifadeler geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın olarak bilinenlerden birisi Pfeiffer ve Van Doormaal tarafından geliştirilen penetrasyon indeksi (*PI*) kavramıdır. Pfeiffer ve Van Doormaal, ASTM yumuşama noktası sıcaklığında pek çok bitümlü bağlayıcı cinsinin 800 civarında bir penetrasyon değerine sahip olacağını bulmuşlardır [16]. Buna dayanarak, Penetrasyon İndeksi (*PI*) değerinin hesaplanmasında bitümlü bağlayıcının 25 °C’deki penetrasyon değeri (*Pen 25*) ve yumuşama noktası (*SP*) değerinin kullanıldığı 3.15’teki eşitliğini ortaya koymuşlardır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(Pen25) - 20 \cdot SP}{50 \cdot \log(Pen25) - SP - 120} \quad (3.15)$$

PI değerleri, yüksek sıcaklık duyarlılığına sahip bitümlü bağlayıcılar için -3, düşük sıcaklık duyarlılığına sahip okside olmuş bitümlü bağlayıcılar için +7 civarındadır.

Bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin kalıcı deformasyon direncine etkilerinin araştırıldığı bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

❖ Brosseaud ve diğ., yumuşama noktası 60 °C'den küçük olan bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa duyarlılığının göz önüne alınması gerektiğini vurgulayarak, bu tür bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri ile tekerlek izi derinlikleri arasında çok yüksek bir korelasyon belirlemişlerdir [41]. Yumuşama noktasındaki 5-6 °C'lik bir artışın, tekerlek izi oluşumunu %20'den fazla bir oranda arttırdığı görülmüştür. Yaşlandırılmış bitümlerin yumuşama noktası değerleri, yaşlanmanın karışımların tekerlek izi davranışına etkisini değerlendirmede yeterli olmamıştır. Araştırmacılar aynı zamanda, bitümlü bağlayıcı oranının arttıkça, tekerlek izi oluşum hızının da arttığını ve SBS (Styrene-Butadiene-Styrene) polimer ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanımının tekerlek izi direncini büyük oranda azalttığını vurgulamaktadırlar.

❖ Bitümlü bağlayıcının penetrasyon indeksinin önemi, Colnbrook geçidinde gerçekleştirilen kapsamlı ve bire bir ölçekli bir yol deneyiyle kanıtlanmıştır. Bu çalışmada farklı reolojik özelliklere sahip bitümler kullanılarak imal edilen aşınma tabakaları gözlenmiştir. Sekiz yıl sonra yolda oluşan tekerlek izi miktarlarıyla “penetrasyon indeksi arasında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür [16]. Dolayısıyla yüksek penetrasyon indeksine sahip bitümlerin kullanılmasının faydası açıkça görülmektedir.

❖ Valkering ve diğ., laboratuvar tekerlek izi deneyleri ve sünme deneyleri ile karışımların tekerlek izi performansının iyileştirilmesinde modifiye bağlayıcıların etkisini araştırmışlardır. Deney sıcaklıklarında geleneksel bağlayıcıların viskoziteleri ile tekerlek izi oranı arasında (tekerlek geçiş sayısı başına mm tekerlek izi miktarı) iyi bir korelasyon bulmuşlardır. Modifiye bağlayıcıların reolojik davranışlarının geleneksel bağlayıcılardan farklı olduğu ve karışımlardaki modifiye edicilerin etkisinin basit sünme deneyi ile tam olarak belirlenemediği vurgulanmaktadır [42].

❖ Dinamik kayma reometresinden (Dynamic Shear Rheometer-DSR) elde edilen “ $|G^*|/\sin \delta$ ” parametresi ile yoğurmalı pres kullanılarak laboratuvar da belirlenen tekerlek izi duyarlılığı arasındaki korelasyonun araştırıldığı bir çalışmada, Hamburg tekerlek izi cihazı, LCPC Fransız tekerlek izi ve Georgia tekerlek izi gibi farklı tekerlek izi direnç ölçüm aletleri arasındaki korelasyonda belirlenmiştir. Bağlayıcı türünün tekerlek izi performansına etkisinin incelendiği araştırmada, tek bir agrega türü ve tane dağılımı ile üç geleneksel bağlayıcı ve iki modifiye bağlayıcı kullanılmıştır. Bu bölüme ilave olarak agrega boyutunun tekerlek izi direncine etkisinin belirlenebilmesi için büyük agrega boyutu ile iki geleneksel bitümlü

bağlayıcı kullanılmıştır. Araştırmacılar, “ $|G^*|/\sin \delta$ ” değerinin tekerlek izi duyarlılığında iyi bir belirleyici olduğu ve düşük “ $|G^*|/\sin \delta$ ” değerli bağlayıcılarla hazırlanan karışımların kötü bir tekerlek izi direnci gösterdiği sonucuna varmışlardır. Kullanılan tekerlek izi deney aletleri arasında Hamburg tekerlek izi deney aletinin sonuçları ve gözlenen tekerlek izi derinliği ile iyi bir korelasyon göstermiştir. En büyük nominal agrega boyutunun değişimiyle karışımların tekerlek izi duyarlılığında, bitümlü bağlayıcı türü kadar bir etki gözlenmemiştir [43].

❖ Karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcının viskozitesinin, karışımın iyi bir tekerlek izi direnci göstergesi olduğu kanısı yaygındır. 60 °C’de geleneksel bağlayıcıların viskozitesinin, laboratuarda 45 °C’de gerçekleştirilen deneyden elde edilen tekerlek izi parametresi N_{10} (10 mm tekerlek izi derinliğine sebep olan tekerlek geçiş sayısı) ile arasında kuvvetli bir ilişkinin varlığı belirlenmiştir. Sybilski [44], deney koşullarından bağımsız ve malzemenin gerçek davranışını yansıttığı düşünülen sıfır kayma viskozitesinin (zero-shear viscosity-ZSV) kalıcı deformasyon ile korelasyonunu araştırmışlardır. 60 °C’deki modifiye ve saf bitümlü bağlayıcıların sıfır kayma viskozitesinin doğrudan doğruya N_{10} ile orantılı olduğunu bulmuştur.

❖ Stuart ve Izzo’nun bulgularının aksine Lealy ve diğ., tekerlek izi aletinden elde edilen tekerlek izi derinliği ile bağlayıcının “ $|G^*|/\sin \delta$ ” değeri arasında çok zayıf bir korelasyon belirlemişlerdir [45]. Araştırmacılar bağlayıcı türü, boşluk yüzdesi ve agrega türünün tekerlek izi performansına etkilerini incelemişlerdir. Deney verileri büyük bir değişkenlik göstermesine karşılık, yüksek sıcaklık (70 °C) ve %7 boşluk oranında taneler arası sürtünmenin azalmasıyla agreganın etkisinin azaldığını ve bağlayıcının etkisinin ön plana çıktığını belirtmektedirler. RSST-CH deneyinden elde edilen kayma değerinin, bitüm ve agrega kaynağı ile boşluk yüzdesinden büyük oranda etkilendiğini vurgulamaktadırlar.

❖ Sherwood ve diğ., bitümlü bağlayıcının “ $|G^*|/\sin \delta$ ” (2.25 rad/s) değeri ile FHWA’nın tekerlek izi aleti (FHWA’s Accelerated Loading Facility-ALF) kullanılarak test edilen karışımların, %10 kalıcı deformasyona sebep olan yük geçiş sayısı arasındaki korelasyonu belirlemiştir. Bu çalışmada, beş farklı bağlayıcı ve iki agrega tane dağılımı kullanılmıştır. Bağlayıcı sertlik derecesi ve agrega tane dağılımının tekerlek izi direnci üzerindeki etkileri, karışımda kullanılan bağlayıcı miktarına bağlı olarak farklı sıcaklıklarda belirlenmeye çalışılmıştır. İki deneyde elde edilen parametreler arasında, bağlayıcı derecesi ve agrega tane dağılımlarındaki duyarlılığının belirlenmesi açısından iyi bir korelasyon bulunmuştur [46].

3.3.2.3 Karışım Özellikleri

Tekerlek izi oluşumu yalnızca bir bitümlü bağlayıcı problemi olarak ileri sürülmesine karşılık, bitümlü bağlayıcı ve mineral agreganın birlikte göz önüne alınması tekerlek izi oluşumunu belirlemede çok daha doğru olacaktır.

Little ve diğ., karışım özelliklerinin kalıcı deformasyon üzerindeki etkilerinin araştırılmasında tek eksenli sünme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Agreganın özelliklerine bağlı olan karışım boşluk yüzdesinin, bir saatlik yükleme sonundaki sabit-gerilme sünme eğrisi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Kullanılan test koşullarında tekerlek izine karşı dirençli karışımlar için sünme modülü değeri 69 MPa'dan büyük olarak belirlenmiştir [47].

Brown ve diğ., tekerlek izi için beş farklı karayolu kesimindeki kaplamalar üzerinde incelemeler yapmışlardır. Bunların dördünde, on yıllık servis ömrü sonunda önemli ölçüde tekerlek izi derinlikleri belirlemişlerdir. Tekerlek izi ve karışım özellikleri arasında korelasyonu belirlemek için regresyon analizi kullanmışlardır. Bu analiz sonuçlarından boşluk miktarının tekerlek izi oluşumunda en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Yapım ve sıkıştırma esnasındaki kontrollerin yetersizliğinden kaynaklanan düşük boşluk miktarına sahip kesimlerde en büyük tekerlek izi derinliğine rastlanmıştır. Esneklik modülü ve çekme dayanımı arazideki tekerlek izi performansını çok az veya hiç yansıtmazken, Marshall akma ölçütünün tekerlek izi direncinin iyi bir göstergesi olduğu görülmektedir. Ayrıca çalışmada soyulmanın da kalıcı deformasyon direncini azalttığı ve bu olumsuz etkinin soyulma direnci yüksek agregalar kullanarak bir nebze önlenebileceğini vurgulamaktadırlar [48].

Mallick ve diğ. tarafından tekerlek izi potansiyeli üzerinde agrega türü ve tane dağılımı ve karışımın boşluk yüzdesinin etkisi, dinamik sünme deneyi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan yükleme koşulları, uçak ve kamyon lastik basınçlarına dikkate alınarak seçilmiştir. Laboratuarda farklı boşluk yüzdesinde sıkıştırılan numuneler üzerinde yürütülen deneyler ile arazide gözlenen tekerlek izi arasında iyi bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Yüksek boşluk yüzdesinde (yaklaşık %7) sıkıştırılan numunelerin dinamik üç eksenli sünme deneyi sonunda oturma miktarına bağlı olarak, beklenen boşluk yüzdesinde azalma gözlenmiştir. Diğer taraftan düşük boşluk yüzdesine sahip (%3'ten az) kaplama karışımlarında ise deney sonunda boşluk yüzdesinde bir artış gözlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda vurgulandığı üzere, bu araştırmacılar da doğal kum ve çakıllı karışımların kırılmış agregalı karışımlarla karşılaştırıldığında daha kötü bir tekerlek izi direnci sergilediğini ortaya koymuşlardır [49].

NCAT tarafından, bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi direncine karışım özelliklerinin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla bir çalışma başlatılmıştır [50]. Bu çalışmada 15 eyaletteki 42 kaplamadan elde edilen veriler kullanılmıştır. Trafik verileri, tekerlek izi ölçüm değerleri, tekerlek izi oluşan bölgelerden alınan karot numunelerin tasarım değerleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında, boşluk oranı %3'ün altındaki karışımlarda erken tekerlek izi oluşumu görülmüştür.

Bir çalışmaya ait kayma deformasyon testi sonuçları, numunelerin hazırlanmasında kullanılan sıkıştırıcı türünün önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [51]. Yoğurmalı sıkıştırıcı (Kneading compactor) kullanılarak sıkıştırılan numuneler, en yüksek tekerlek izi direncine sahipken, yoğurmalı pres ile sıkıştırılan numunelerde en az tekerlek izi direnci gözlenmiştir. Çizgisel silindir sıkıştırıcılar ile, düşük ince malzeme oranlarında ve optimum bağlayıcı viskozitesinde daha rijit karışımlar üretilmiştir. Yoğurmalı sıkıştırıcı kullanılarak, normal ince malzeme miktarı ve yüksek bağlayıcı viskozitesinde daha rijit karışımlar elde edilmiştir. Yoğurmalı sıkıştırıcı ile düşük boşluk yüzdesinde hazırlanan numuneler, agregaların kırılmasına bağlı olarak kötü bir performans sergilemiştir.

3.3.2.4 Çevre ve Trafik Koşulları

Bitümlü bağlayıcının termo-plastik özelliği sebebiyle, hava sıcaklığı ve kaplamanın maruz kaldığı güneş ışınları bitümlü sıcak karışımların özelliklerini etkilemektedir. Düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olan bitümlü malzemeler, siyah rengine bağlı olarak dış sıcaklığı emme eğilimindedir. Yüksek sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcının viskozitesi azaldığından, özellikle uzun zaman süresince yüksek sıcaklıklara maruz asfalt kaplamalarda kalıcı deformasyonlar gözlenmektedir. Bu bozulma, sıcak iklimlerde yumuşak bağlayıcı kullanılan kaplamalarda daha fazla meydana gelmektedir. Kaplamanın maruz kaldığı nemli ortamların da kalıcı deformasyonu olumsuz yönde etkilediği vurgulanmaktadır [52].

Son yıllarda artan taşıt miktarına bağlı olan yükleme tekrarı ve ağır taşıt trafiğindeki artış kalıcı deformasyon oluşumunda önemi bir artışa sebep olmuştur. Bununla beraber, kamyon lastik basınçlarının 500 kPa olan normal şişirme basıncından 750 kPa çıkması başlıca sebep olarak görülmektedir.

Kalıcı deformasyonu etkileyen trafik ile ilişkili diğer bir faktör de yükleme süresidir. Yükleme süresi arttıkça, kalıcı deformasyon birikmesi de hızlanır. Yani trafik akışının yavaş olduğu sağ şeritlerde ve durduğu kavşaklarda tekerlek izi oluşumuna daha sık rastlanmaktadır.

3.3.3 Kalıcı Deformasyonun Tahmininde Kullanılan Deneyler

Performans tahmin modellerinin gelişimi için yalnızca yük altındaki kaplama davranışının değil, aynı zamanda malzeme özelliklerini gerçekçi bir şekilde saptayabilecek uygun deney yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Laboratuarda uygulanan deneyler, arazi kaplama koşullarını yansıtacak şekilde genel gerilme durumu, sıcaklık, nem ve genel malzeme koşullarını içermelidir. Asfalt kaplamaların kalıcı deformasyon davranışını saptamak için birçok yöntem kullanılmaktadır.

Bu bölümde, NCAT 2001-05 raporunda kapsamlı olarak ele alınan kalıcı deformasyon deneyleri temel, ampirik ve benzetim deneyleri olarak üç ana kategori altında kısaca özetlenmiştir [53]. Bu kategorilerde yer alan her bir deneyin üstünlük ve eksiklikleri tablolar halinde sunulmuştur.

3.3.3.1 Temel Deneyler

Bitümlü karışımların performans-esaslı davranışını en iyi şekilde yansıtan temel deneyleri çapsal (dolaylı çekme), tek eksenli, üç eksenli ve kayma deneyleri olarak sınıflandırabiliriz. Her bir deney grubu kalıcı deformasyonlar açısından genel olarak değerlendirilmiştir.

❖ Çapsal Deneyler (Dolaylı Çekme Deneyleri)

Bu gruptaki deneylerde kullanılan silindirik numuneler çap doğrultusunda test edilmektedir. Bu grup dolaylı çekme aletinde gerçekleştirilen statik sünme, tekrarlı sünme, dinamik modül ve dolaylı çekme dayanımı deneylerini içermektedir. Kalıcı deformasyonun değerlendirilmesinde Tablo 3.10'da verilen çapsal deneyler uygun görülmemektedir. Bu deneyler, arazideki davranışın aksine, bitümlü bağlayıcı değişiminden çok fazla etkilenen deneylerdir. Tekrarlı yüklemenin gerekmediği durumlar için bu kategorideki deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan donanım maliyeti nispeten düşüktür. Eğer tekrarlı yükleme gerekirse maliyet oldukça yükselmekte ve testin zorluk derecesi de artmaktadır.

Tekerlek izi tahmininde çapsal deneylerin kullanıldığı çalışmalara ait bazı veriler, bu tip deneyler ile kaplama performansı arasındaki ilişkinin varlığını göstermektedir. Fakat bu korelasyon diğer deney yöntemlerine nazaran daha zayıftır. Bu deneyler bir performans göstergesi olarak kullanılmasına rağmen, diğer kalıcı deformasyon deneyleri kadar başarılı olamamaktadır.

Tablo 3.10: Çapsal Deneilerin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
Dolaylı çekme statik yükleme (sünme)	101,6 x 63,5 mm (çap x yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Donanım genellikle çoğu laboratuarda mevcuttur.• Numuneler kolay hazırlanır.	<ul style="list-style-type: none">• Gerilme durumu üniform değildir ve numune şekline bağlıdır.• Deney, kalıcı deformasyonun tahmininde uygunsuzdur.
Dolaylı çekme tekrarlı yükleme	101,6 x 63,5 mm (çap x yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Numuneler kolay hazırlanır.	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek sıcaklık yüklemelerinde değişen numune şekli, gerilme durumunu ve deney ölçümlerini önemli oranda etkiler.
Dolaylı çekme dinamik modül	101,6 x 63,5 mm (çap x yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Hasarsız bir deneydir.	<ul style="list-style-type: none">• Deneyler, tekerlek izini olduğundan fazla değerlerde bulmaktadır.
Dolaylı çekme dayanımı	101,6 x 63,5 mm (çap x yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Donanım genellikle çoğu laboratuarda mevcuttur.• Numuneler kolay hazırlanır.• En az test süresi gerektirir.	<ul style="list-style-type: none">• Dinamik test için gerekli donanım karışıktır.• Deney kalıcı deformasyonla zayıf bir ilişki içerisindedir.

❖ Tek Eksenli Deneiler

Performans tahmininde kullanıma potansiyeline sahip ikinci tip temel deneyler, tek eksenli deneylerdir. Tablo 3.11’de verilen bu grupta statik sünme, tekrarlı sünme, dinamik modül ve basınç dayanım deneyleri yer almaktadır. Laboratuarda uygulanan sıcaklık ve gerilmenin, karışımların arazide maruz kalacağı durumlarla benzer olması gerekmektedir. Tek eksenli deneylerinde uygulanan yük ve sıcaklık düzeyleri arazi koşullarına göre önemli ölçüde azaltılmaktadır. Aksi takdirde yeterli veri toplanmadan numuneler erken bozulmaya uğramaktadır. Bu sebepten, tek eksenli deneylerin performans tahmin yeteneği yetersiz kalmasıdır. Statik yüklemeli tek eksenli deneyler, dinamik deneylere nazaran basit ve ucuzdur. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarının performans ile korelasyonu hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Performansla ilişkisini gösteren bazı çalışmalar mevcuttur. Fakat bu korelasyonun zayıf olması ve standart yoksunluğu sebebiyle bu testlerden hiçbiri kalıcı deformasyon tahmininde önerilmemektedir [53]. Bununla beraber, bu deneylerden bazıları NCHRP 9–19 projesi dâhilinde incelenmiş ve kalıcı deformasyon tahmininde kullanılan deneyler arasında belirtilmiştir.

Tablo 3.11: Tek Eksenli Deneilerin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
Tek eksenli statik yükleme (sünme)	101,6 x 203,2 mm (çap x yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Deney donanımları basit ve genellikle mevcuttur.• İyi bilinen ve yaygın bir deneydir.• Çok fazla teknik bilgi mevcuttur.	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin tekerlek izi tahmin yeteneği şüphelidir.• Sınırlı deney sıcaklıkları ve yük düzeyleri arazi koşullarını yansıtmaz.• Deney trafiğın dinamik etkilerini yansıtmaz.• Laboratuarda 2:1 oranında numune hazırlanması zordur.
Tek eksenli tekrarlı yükleme	101,6 x 203,2 mm (çap x yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none">• Deney trafik koşullarını daha iyi yansıtır.	<ul style="list-style-type: none">• Donanımlar çok karmaşıktır.• Sınırlı deney sıcaklıkları ve yük düzeyleri arazi koşullarını yansıtmaz.• Laboratuarda 2:1 oranında numune hazırlanması zordur.
Tek eksenli dinamik modül	101,6 x 203,2 mm (çap x yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none">• Hasarsız bir deneydir.	<ul style="list-style-type: none">• Donanımlar çok karmaşıktır.• Laboratuarda 2:1 oranında numune hazırlanması zordur.
Tek eksenli dayanım deneyi	101,6 x 203,2 mm (çap x yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Deney donanımları basittir.• En az test süresi gerektirir.	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin kalıcı deformasyon tahmin yeteneği şüphelidir.

❖ Üç Eksenli Deneiler

Bu deney grubu ile tek eksenli deneyler arasındaki farklılık numuneye yanal basınç uygulanmasıdır. Uygulanan yanal basınç, deney numunesinin erken bir bozulmaya uğramadan, arazideki basınç ve sıcaklığa çok yakın bir benzerlikte test edilmesine müsaade etmektedir. Kalıcı deformasyonların belirlenmesine yönelik üç eksenli statik sünme ve tekrarlı sünme deneyleri ile yapılan çalışmaların çokluğuna rağmen, dinamik modül ve üç eksenli kayma mukavemeti deneyleri için fazla çalışma bulunmamaktadır. Tablo 3.12’de verilen bu kategorideki deneylerin üç eksenli hücresi gerektirmesi, deneyi daha maliyetli ve karmaşık hale getirmesine rağmen, yinede bu deneylerin yaygın bir şekilde kullanılmasının önüne geçememiştir.

Üç eksenli statik ve dinamik sünme deneyleri yüksek bir kalıcı deformasyon tahmin potansiyeline sahiptir. Her iki deney NCHRP 9–19 projesi kapsamında incelenmiş ve önerilmiştir. Üç eksenli statik sünme deneyi basit ve kolay gerçekleştirilebilir

olmasına rağmen tekerlek izi korelasyonu çok iyi değildir. Bu deney yerine, kalıcı deformasyon performansı ile korelasyonu daha iyi olan üç eksenli tekrarlı sünme deneyi önerilmektedir [53].

Tablo 3.12: Üç Eksenli Deneilerin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
Üç eksenli statik yükleme (sünme)	101,6 × 203,2 mm (çap × yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none"> • Deney ve donanımı kısmen basittir. • Deney sıcaklıkları ve yük düzeyleri arazi koşullarını tek eksenli deneylerden daha iyi yansıtır. • Deney kısmen ucuzdur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deney, üç eksenli hücresi gerektirir. • Hücre basıncı (yanal basınç) deneyin karmaşıklığını artırır.
Üç eksenli tekrarlı yükleme	101,6 × 203,2 mm (çap × yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none"> • Deney sıcaklıkları ve yük düzeyleri arazi koşullarını tek eksenli deneylerden daha iyi yansıtır. • Deney trafik koşullarını daha iyi ifade eder. • Deney farklı numune boyutlarına yer verir. • Ölçüt mevcuttur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Donanım kısmen karmaşık ve pahalıdır. • Deney, üç eksenli hücresi gerektirir.
Üç eksenli dinamik modül	101,6 × 203,2 mm (çap × yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal analiz için gerekli girdi sağlar. • Hasarsız bir deneydir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek sıcaklıklarda deney sistemi çok karışıktır. • LVDT'lerin numune üzerine yerleştirilmesinde küçük problemler ile karşılaşılabilir. • Donanımlar çok karmaşık ve pahalıdır. • Deney, üç eksenli hücresi gerektirir.
Üç eksenli dayanım deneyi	101,6 veya 152,4 × 203,2 mm (çap × yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none"> • Deney ve donanımı kısmen basittir. • En az test süresi gerektirir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deneyin kalıcı deformasyon tahmin yeteneği şüphelidir. • Deney, üç eksenli hücresi gerektirir.

❖ Kayma Deneyleri

Bu kategoride ele alınan kayma deneyleri Tablo 3.13'te verilmiştir. Superpave kayma test cihazı (Superpave shear tester-SST) bitümlü sıcak karışımların kayma karakteristiklerinin ölçülmesi için SHRP kapsamında geliştirilmiştir. Karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma gibi performans özelliklerini belirlemek üzere SST

ile altı farklı deney yürütülmektedir. Kalıcı deformasyonların değerlendirilmesinde SST frekanslı kayma deneyi ve SST sabit yükseklikte tekrarlı kayma deneyleri kullanılmaktadır. Bu deneyler çok karmaşık ve pahalı olmasının yanında, halen kabul edilen bir performans tahmin modeline sahip değildir. Aynı zamanda karmaşıklığı sebebiyle kalite kontrol deneyi olarak ta kullanılamamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan üç eksenli kayma mukavemeti deneyi NCAT 2001-05 raporunda bu kategori içerisinde belirtilmiştir. Yaygın bir kullanıma sahip olmayan bu deney dördüncü bölümde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

Tablo 3.13: Kayma Deneylerinin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
SST frekanslı kayma deneyi - dinamik kayma modülü	152,4 × 50,8 mm (çap × yükseklik)	<ul style="list-style-type: none"> • Uygulanan kayma şekil değiştirmeleri trafiğin etkisini yansıtır. • Deney prosedürü, AASHTO standartlarında mevcuttur. • Numuneler SGC ile hazırlanır. • Deney eğrisi farklı sıcaklık ve frekanslar için çizilebilir. • Hasarsız bir deneydir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deney son derece pahalı ve çok az mevcuttur. • Deney, karmaşık ve gerçekleştirilmesi oldukça zordur, genellikle özel bir eğitime gereksinim duyulur. • SGC numunelerinin deneyden önce kesilmesi ve yapıştırılmasını gerektirir.
SST sabit yükseklikli tekrarlı kayma	152,4 × 50,8 mm (çap × yükseklik)	<ul style="list-style-type: none"> • Uygulanan kayma şekil değiştirmeleri trafiğin etkisini yansıtır. • AASHTO prosedürü mevcuttur. • Numuneler, SGC numunelerinden elde edilir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deney son derece pahalı ve çok az mevcuttur. • Deney, karmaşık ve gerçekleştirilmesi oldukça zordur, genellikle özel bir eğitime gereksinim duyulur. • SGC numunelerinin deneyden önce kesilmesi ve yapıştırılmasını gerektirir. • Deney sonuçları, yüksek bir varyasyon katsayısına sahiptir. • Üçten fazla deney tekrarına gereksinim duyulur.
Üç eksenli kayma gerilmesi deneyi	101,6 veya 152,4 × 203,2 mm (çap × yükseklik) ve diğer boyutlar	<ul style="list-style-type: none"> • Deney süresi çok kısadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deney oldukça az kullanılır. • Numuneye yanal basınç uygulanması karmaşıklığı artırır.

3.3.3.2 Ampirik Deneyler

Bu kategoride, Marshall stabilite ve akma, Hveem stabilite, yoğurmalı pres (gyratory testing machine-GTM) ve yatay basınç ölçme aleti yer almaktadır. Yıllardan beri çok yaygın olarak kullanılan Marshall ve Hveem deneyleri karışım davranışını tam olarak yansıtmamaktadır. Birçok çalışmadan elde edilen genel kanı, Marshall deneyinin bitümlü karışımların tekerlek izi performansını yansıtmadığıdır. Bu kanı yanında, Marshall akma oranının, kalıcı deformasyon direncini yansıtan bir gösterge olduğunu belirten araştırmacılarda olmuştur [54].

Marshall stabilite değerinin akma değerine oranı olarak tanımlanan akma oranı, en büyük sınır olarak belirlenen 16 değerini aştığında tekerlek izi oluşacağı belirtilmektedir. Asfalt Enstitüsü rehberinde, bu oranın trafik hacmi düşük düzeyde olan yollar için 8–18, trafik hacmi orta düzeyde olan yollar için 8–16 ve trafik hacmi yüksek düzeyde olan yollar için 8-14 arasında olması önerilmektedir.

Yaygın bir kullanıma sahip olmayan GTM, kalıcı deformasyon tahmin potansiyeline sahip olmasına rağmen, kabul edilebilirliği açısından yeterli bilgi bulunmamaktadır. Yoğurmalı sıkıştırma sırasında karışımların kayma direncini belirlemek için geliştirilen cihazı (Gyratory Load Cell Plate Assembly-GLPA) kullanarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir [11]. Buradan belirlenen kayma parametreleri ile, yine laboratuarda gerçekleştirdiği üç eksenli sünme deneyi sonuçları arasında bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. GLPA' dan elde edilen kayma parametresinin kalıcı deformasyon direnci ile olan bu ilişkisinden dolayı, karışım tasarımında ve kalite kontrol parametresi olarak kullanımını önermektedir.

Yatay basınç ölçüm aleti (Lateral pressure indicator-LPI) gelecek için umut verici pratik bir testtir. Bu deney çok az bir emek ve maliyet gerektirmektedir. Çoğu uygulamacı, bu deneyin performansla ilişkisinin tam olarak ortaya konmasını beklemektedir. Tablo 3.14'te özetlenen bu ampirik testlerin kullanımı, genelde kalıcı deformasyon direncinin belirlenmesinde önerilmemektedir.

3.3.3.3 Benzetim Deneyleri

Son kategoride yer alan deneyler, başta tekerlek izi deneyleri olmak üzere benzetim deneylerini içerir. Tablo 3.15'te verilen APA tekerlek izi, Hamburg tekerlek izi ve LCPC Fransız tekerlek izi deneylerinden gerçekçi sonuçlar sağlandığı görülmekte ve elde edilen performans-ilişkili olan bu veriler, özel ölçütlerin belirlenmesinde kullanılabilir.

Tablo 3.14: Ampirik Deneylerin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
Marshall deneyi	101,6×63,5 mm (çap×yükseklik) veya 152,4×88,9 mm (çap×yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• İyi bilinen, yaygın ve standartlaştırılmış bir deneydir.• Deney prosedürü standartlaştırılmıştır.• Gerçekleştirilmesi en kolay ve deney süresi en kısa bir deneydir.• Donanım tüm laboratuarlarda mevcuttur.	<ul style="list-style-type: none">• Karışımların kalıcı deformasyonlarını doğru olarak belirleyemez.• Performansla ilişkisini gösteren çok az veri vardır.
Hveem deneyi	101,6×63,5 mm (çap×yükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• İyi temel bir felsefeyle geliştirilmiştir.• Deney süresi kısadır.• Üç eksenli yük uygulanır.	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin geçmişinde Marshall gibi yaygın bir kullanıma sahip değildir.• Kaliforniya yoğurmalı sıkıştırıcısına gereksinim duyulur.• Karışımların kalıcı deformasyonlarını doğru olarak belirleyemez.
Yoğurmalı pres (Gyratory testing machine-GTM)	Gevşek karışım	<ul style="list-style-type: none">• Deney, yapım sırasındaki silindir hareketini yansıtır.• Parametreler sıkıştırma sırasında elde edilir.• Ölçütler mevcuttur.	<ul style="list-style-type: none">• Donanımlar yaygın değildir.• Karışımların kalıcı deformasyonlarını doğru olarak belirleyemez.
Yatay basınç tespit aleti	Gevşek karışım	<ul style="list-style-type: none">• Deneyin yapılması kolaydır.• Donanım genellikle çoğu laboratuarda mevcuttur.• Numuneler kolay hazırlanır.• En az test süresi gerektirir.	<ul style="list-style-type: none">• Deney sonuçlarının yorumlanmasında problemler çıkar.• Mevcut veri azdır.

Mevcut bilgilere dayanarak APA tekerlek izi, Hamburg tekerlek izi ve LCPC Fransız tekerlek izi deneylerinin arazideki davranışı yansıttığı, karışım tasarımı ve kalite kontrolünde kullanılabileceği söylenebilir. Ölçütlerin belirlenmesinde yeterli veri mevcuttur. Bu deneyler kalıcı deformasyon davranışının belirlenmesinde tek ve son yöntem değildir. Fakat en iyi yöntem bulunana kadar uygulamaya hizmet edecek efektif yöntemlerden birisidir.

Tablo 3.15: Benzetim Deneylerinin Üstünlük ve Eksiklikleri [53]

Deney Yöntemi	Numune Boyutu	Üstünlükleri	Eksiklikleri
APA tekerlek izi	152,4x88,9 mm 152,4x114,3 mm (çap x yükseklik) veya kiriş numuneler	<ul style="list-style-type: none">• Deney, arazideki trafik ve sıcaklık koşullarını yansıtır.• Deneyin yapılması basittir.• Aynı anda 3-6 adet numune test edilebilir.• Şartname ölçütleri mevcuttur.• Silindirik numuneler hazırlanmasında SGC kullanılır.• Amerika'da tekerlek izi deneyleri arasında en yaygın olarak kullanılanıdır.	<ul style="list-style-type: none">• Deney kısmen pahalıdır.• Deney donanımları laboratuvarlarda yaygın olarak bulunmaz.
Hamburg tekerlek izi	259x320x41 mm (enxboyxyükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Deney Almanya'da yaygın olarak kullanılır.• Deney su hasarını da değerlendirir.• Aynı anda 2 adet numune test edilir.	<ul style="list-style-type: none">• Deney donanımları laboratuvarlarda yaygın olarak bulunmaz.• Deney numunelerinin hazırlanması için özel donanıma gereksinim duyulur.
LCPC Fransız tekerlek izi	180x500x20-99 mm (enxboyxyükseklik)	<ul style="list-style-type: none">• Fransa'da başarı ile kullanılır.• Aynı anda 2 adet numune test edilir.	<ul style="list-style-type: none">• Deney donanımları laboratuvarlarda yaygın olarak bulunmaz.• Deney numunelerinin hazırlanması için özel donanıma gereksinim duyulur.

3.3.4 Kalıcı Deformasyon Tahmin Modelleri

Asfalt kaplamaların hizmet ömrünü belirleyen etkenlerden biride tekerlek izi derinliğidir. Dolayısıyla kaplamanın ömrünün belirlenmesinde, oluşum mekanizması ve etkileyen sebeplerin değinildiği kalıcı deformasyonların, tahmin edilebilmesine gereksinim duyulmaktadır. Bu bağlamda, farklı deney yöntemleri, malzeme ve karışım parametrelerini kullanan birçok matematiksel ve istatistiksel modeller geliştirilmiştir. Bu bölümde, bahsi geçen modellerden bazılarına yer verilmiştir.

Kalıcı deformasyon kaplama tasarımında önemli bir faktördür. Kalıcı deformasyonlar, yol üstyapısının herhangi bir tabakasında oluşabilmektedir. Dolayısıyla, tekerlek izinin tahmin edilebilmesi için her bir tabakada kullanılan malzemelerin kalıcı deformasyon özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde, numunelerin hazırlanmasında ve test edilmesinde kullanılan deney yöntemleri ve prosedürleri önemlidir. Bunun yanında, trafik ve çevre koşullarındaki değişiklikler tekerlek izi tahminini son derece zorlaştırmaktadır. Kalıcı deformasyonların tahmininde basitleştirilmiş yöntemler kullanılmasına rağmen, yeni deney yöntemleri ve hesaplama teknikleri ile gerçekçi modellerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Tekerlek izi derinliğinin belirlenmesi için geliştirilen modellerin temelini aşağıdaki sistematik oluşturmaktadır:

- Kaplamayı oluşturan her tabakanın ortasındaki aksenal ve yanal gerilmeler hesaplanır.
- Hesaplanan deviatör gerilmelerin kullanıldığı üç eksenli tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirilir. Yükleme tekrar sayılarına karşılık gelen şekil değiştirme miktarları belirlenir.
- Tabaka kalınlıkları ile testlerden elde edilen kalıcı deformasyonlar çarpılarak istenilen yükleme tekrar sayısı için her bir tabakada oluşacak düşey şekil değiştirmeler hesaplanır.
- Yüzeydeki tekerlek izi derinliğinin belirlenmesi için tüm tabakalardaki kalıcı deformasyonlar toplanır.

Genellikle, tasarım süresinde eşdeğer tekil dingil yükü ve ortalama malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Fakat çevresel koşullar ve dingil yüklerine bağlı olarak gerilmelerde oluşabilecek değişiklikler sebebiyle bu yöntemin tam olarak uygulanması mümkün değildir. Farklı deney koşullarında gerçekleştirilen kalıcı deformasyon deney sonuçlarından tekerlek izi tahmin modellerinin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma mevcuttur. Bu bölümde, bitümlü kaplama tabakaları için geliştirilen kalıcı deformasyon modellerinden bazıları hakkında bilgi verilmektedir:

❖ Tseng ve Lytton tarafından tekrarlı yükler altında kalıcı deformasyonun tanımlanmasında 3.16 nolu denklemde verilen üç-parametrelili üssel bir model sunulmuştur [55]. Bu modeldeki sabitler doğrusal olmayan regresyon analizinden elde edilmektedir.

$$\varepsilon_p = \alpha \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad (3.16)$$

ε_p : Kalıcı (plastik) deformasyon

N : Yükleme tekrar sayısı

α, β, ρ : Regresyon sabitleri

Kalıcı deformasyon iyi bir tahmin sağlayan bu modelde, analiz için statik sünme deneyinden daha çok tekrarlı sünme deneyi verilerine gereksinim duyulmaktadır. Kukla malzeme özellikleri olarak tanımlanan model parametreleri doğrusal olmayan regresyon teknikleriyle belirlenmektedir.

❖ Tek eksenli statik sünme deneyi, kalıcı deformasyon potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan bir deneydir. Sünme deneyi yalnızca visko-elastik sistemlerin analizi için veri elde edilmesinde değil, bitümlü tabakaların kalıcı deformasyonuna bağlı tekerlek izi derinliğinin tahmininde de kullanılmaktadır. Tek eksenli statik sünme deneyi analizinde yaygın olarak kullanılan yöntem Shell kalıcı deformasyon tahmin modelidir. Shell kaplama tasarım rehberinde yer alan bu model Van de Loo tarafından geliştirmiştir [56, 57]. Bu modelde tekerlek izi derinliği (h) 3.17 eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$h = H \cdot C_m \cdot Z \cdot \frac{\sigma_{ort}}{S_k} \quad (3.17)$$

C_m : Laboratuardaki statik yüklerin arazideki dinamik yüklere dönüştürülmesinde kullanılan düzeltme faktörü (1-2 değerleri arasında)

Z : Gerilme dağıtma faktörü

H : Bitümlü tabakanın kalınlığı

σ_{ort} : Ortalama lastik değme basıncı

S_k : Karışımın rijitlik modülü

❖ Finn ve diğ., S_{mix} değerinin sünme deneyi sonuçlarından alındığı ve C_m değerinin “1” farz edildiği basitleştirilmiş bir prosedür önermişlerdir [58]. Ayrıca, statik sünme deneyi için sünme zamanlarını yükleme tekrar sayısına çevirmek için basit bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntemde, tekrarlı yükleme deneyinde her bir yük uygulama süresi 0,1 s olduğundan, sünme zamanına karşılık gelen tekrar sayısı olarak 0,1 N alınmaktadır.

❖ Mahboub tarafından, Shell kalıcı deformasyon modeli modifiye edilerek, karışım rijitliğinin viskoz ve visko-plastik bileşenleri ile non-lineerite etkilerini dikkate alan 3.18'deki model geliştirilmiştir [59].

$$h = H \cdot \left(\frac{Z \cdot \sigma_{las}}{\sigma_{lab}} \right)^{1.61} \cdot \varepsilon_{vp}(t) \quad (3.18)$$

h : Hesaplanan kalıcı deformasyon miktarı, mm

H : Bitümlü tabakanın kalınlığı, mm

Z : Elastik tabaka çözümünden bulunan düşey gerilme dağıtma faktörü

σ_{las} : Ortalama lastik değme basıncı, kPa

σ_{lab} : Sünme deneyinin yürütüldüğü gerilme düzeyi, kPa

$\varepsilon_{vp}(t)$: Sünme deneyinden ölçülen visko-plastik şekil değiştirme, mm/mm
birim şekil değiştirme

❖ Asfalt Enstitüsü müsaade edilebilir maksimum tekerlek izi ölçütü olarak 3.19'daki denklemi önermiştir [60].

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_e)^{-4.477} \quad (3.19)$$

N_d : Müsaade edilebilir yükleme tekrar sayısı

ε_e : Eksenel (düşey) şekil değiştirme miktarı

❖ Kalıcı deformasyonun tahmini için Hamburg tekerlek izi aleti ve sabit yükseklikte tekrarlı kayma deneyi sonuçlarından yararlanılarak oluşturulan modeller 3.20 ve 3.21 nolu eşitliklerde verilmiştir [61].

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_p(L) + a \log N \quad (3.20)$$

$$\log \varepsilon_p(N) = \log \varepsilon_p(L) + b \log N \quad (3.21)$$

$\varepsilon_p(N)$: N yükleme tekrarı için toplam kalıcı deformasyon

$\varepsilon_p(N), a, b$: Malzeme sabitleri

❖ SHRP A-003A projesi kapsamında 3.22'deki tekerlek izi tahmin modeli geliştirilmiştir [62]. Bu model, Superpave sabit yükseklikte tekrarlı basit kayma deneyi sonuçlarından yararlanılarak oluşturulmuştur. Deneyde uygulanacak yükleme tekrar sayısı 3.23'te verilen denklemle belirlenmektedir.

$$TD = 280 \times \gamma_p \quad (3.22)$$

TD : Tekerlek izi derinliği, mm

γ_p : En büyük kalıcı kayma deformasyonu

$$\log(\text{yükleme tekrar sayısı}) = -4.36 + 1.24 \times \log(ESALs) \quad (3.23)$$

❖ Kandhal ve Mallick tarafından kırmataş (granit ve kireçtaşı) ve çakıl agrega kullanılan karışımlarda oluşan tekerlek izinin film kalınlıklarıyla korelasyonu araştırılmıştır [63]. Film kalınlığına bağlı tekerlek izi tahmin modeli olarak, tüm karışımlar için denklem 3.24 bağıntı, granit ve kireçtaşı binder tabakaları için denklem 3.25 ve çakıl agregalı aşınma tabakaları için denklem 3.26'daki bağıntılar belirlenmiştir.

$$TD = 2.53 + 0.035 \times (D_f) \quad (3.24)$$

TD : Tekerlek izi derinliği, mm

D_f : Film kalınlığı, mm

$$TD = 37.05 - 6.137(D_f) + 0.2754 \times (D_f)^2 \quad (3.25)$$

$$TD = 19.39 - 14.017 \log(D_f) \quad (3.26)$$

❖ Shami ve diğ. tarafından APA test sonuçlarına dayanarak geliştirilen ve verilen deney sıcaklıkları ve yüklemeye tekrar sayısı terimlerini içeren sıcaklık etki modeli 3.27 nolu eşitlikte sunulmuştur [64].

$$\left(\frac{R}{R_0}\right) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2.625} + \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0.276} \quad (3.27)$$

R_0 : Referans tekerlek izi derinliği

T, N : Tekerlek izinin belirlendiği sıcaklık ve yüklemeye tekrar sayısı

T_0, N_0 : R_0 'daki referans sıcaklık ve yüklemeye tekrar sayısı

❖ Zahw ve diğ., kaba agrega su absorpsiyonu, bitüm viskozitesi, sıkıştırma enerjisi, uygulanan gerilme miktarı ve dolaylı çekme gerilmesini içeren 3.28'deki kalıcı deformasyon tahmin modelini sunmuşlardır [65].

$$TD = 61.525 - 50.695 \times CA_{abs} - 0.0226 \times B_{vis} - 0.315 \times E_S + 23.562 \times \sigma_{uyg} - 11,688 \times S_T \quad (3.28)$$

CA_{abs} : Kaba agrega su absorpsiyon yüzdesi

B_{vis} : Karışımda kullanılan bitümün kinematik viskozitesi, santistok

E_S : Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı

σ_{uyg} : Uygulanan gerilme, MPa

S_T : Dolaylı çekme dayanımı, MPa

❖ Leahy tarafından sıcaklık, gerilme düzeyi ve viskozite, efektif bağlayıcı hacmi ve boşluk yüzdesi gibi karışım özelliklerine bağlı olarak kalıcı deformasyonun elastik şekil değiştirmeye oranı belirlemek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir [66]. Model verileri, çeşitli bitümlü karışım deney kombinasyonlarının test edilmesinde kullanılan tek eksenli tekrarlı sünme deneyinden elde edilmiştir. Korelasyon katsayısının (R^2) 0.76 olduğu model 3.29 nolu eşitlikte sunulmuştur.

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e}\right) = -6.631 + 0.435 \log N + 2.767 \log T + 0.110 \log S + 0.118 \log \eta_{20} + 0.930 V_{bef} + 0.501 \log V_h \quad (3.29)$$

ε_p : Toplam kalıcı deformasyon

ε_e : Elastik şekil değiştirme

N : Yükleme tekrar sayısı

T : Kaplama veya deney sıcaklığı, °C

S : Deviatör gerilme, kPa

η_{20} : 20 °C'deki viskozite (10^6 puaz)

V_{bef} : Hacimce efektif bitüm içeriği

V_h : Karışımın boşluk yüzdesi

AYMA programı, esnek kaplama tasarımı ve analizi için Ayres tarafından geliştirilen rasyonel mekanistik bir modeldir [67]. Leahy'in çalışmasının modifiye edilmiş hali olan program, yorulma çatlakları, kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklık çatlaklarını içeren bozulma türlerini ayrı ayrı ve beraber ele almaktadır. Ayres, karışım parametrelerinin modelden çıkarılması ve yalnızca deney sıcaklığı ile yükleme tekrar sayısını içermesi, modelin doğruluğunu çok az azalttığı sonucuna varmıştır. Kalıcı deformasyon analizinde kullanılan log-doğrusal model denklem 3.30'da görülmektedir.

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e}\right) = -4.80661 + 2.58155 \times \log T + 0.429561 \times \log N \quad (3.30)$$

- ε_p : Toplam kalıcı deformasyon
 ε_e : Elastik şekil değiştirme
 N : Eşdeğer yükleme tekrar sayısı
 T : Kaplama sıcaklığı, °C

❖ Toplam kalıcı deformasyon ile yükleme tekrarı arasındaki bağıntının verildiği Şekil 3.16’da görüldüğü gibi toplam kalıcı deformasyon, birincil, ikincil ve üçüncül bölge olarak adlandırılan üç safhadan oluşmaktadır. Birincil safhada, hızlı bir şekil değiştirme birikmesi meydana gelmektedir. Bununla beraber, yükleme tekrarı başına azalma eğiliminde olan kalıcı deformasyon, ikincil safhanın başlangıç noktası olarak tarif edilen noktada sabit bir değere ulaşır. Üçüncül bölgenin başlangıcında, devir başına kalıcı deformasyon tekrar hızlı bir şekilde artmaya başlar. Üçüncül akmanın başladığı yükleme tekrar sayısı Witczak ve diğ. tarafından “Akma Sayısı” olarak isimlendirilmekte ve bitümlü karışımların tekerlek izi direnci belirleyicisi olarak önerilmektedir [68].

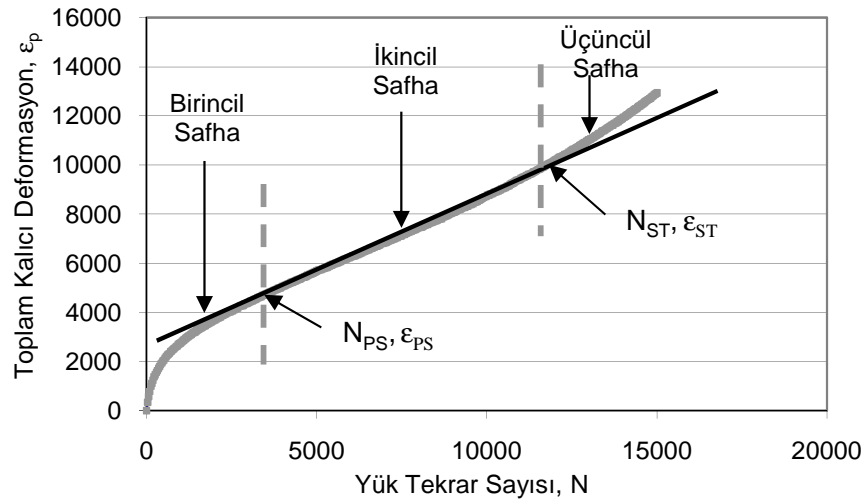
Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de birincil ve ikincil safhaların geçiş noktasındaki yükleme tekrar sayısı ve toplam kalıcı deformasyon değerleri sırasıyla N_{PS} ve ε_{PS} olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde ikincil ve üçüncül safhanın geçiş noktası (F_n), N_{ST} ve ε_{ST} ile temsil edilir. İkincil ve üçüncül safhaların başlangıç noktalarının belirlenmesinde çok dikkatli olunmalıdır. Şekil 3.16’daki doğrusal ölçekli grafikte düz çizginin bittiği nokta üçüncül safhanın başlangıcını gösterirken, Şekil 3.17’deki logaritmik ölçekli grafikte düz çizginin bittiği nokta ikincil bölgenin başlangıcını göstermektedir. Zhou ve diğ., bu üç safhanın tanımına dayanarak, bitümlü karışımların kalıcı deformasyon davranışını niteleyen 3.31’deki tipik üssel modelin yalnızca birincil safhayı temsil edebileceğini belirtmektedirler. Akma sayısının kullanıldığı 3.32 nolu denklemde ikincil bölgeyi niteleyen basit bir lineer model, üçüncül bölgedeki kalıcı deformasyon ifade etmek için 3.33’teki modeli sunmuşlardır. Akma sayısına odaklanılan bu çalışmada diğer model parametreleri tekrarlı yükleme deneyinden elde edilmiştir [69]. Zhou ve diğ. tarafından önerilen üç safhalı kalıcı deformasyon modeli kalıcı deformasyon eğrisini simgelemekte ve akma sayısını belirlemekte kullanılmaktadır:

$$\text{Birincil Safha} : \varepsilon_p = aN^b \quad \rightarrow \quad N < N_{PS} \quad (3.31)$$

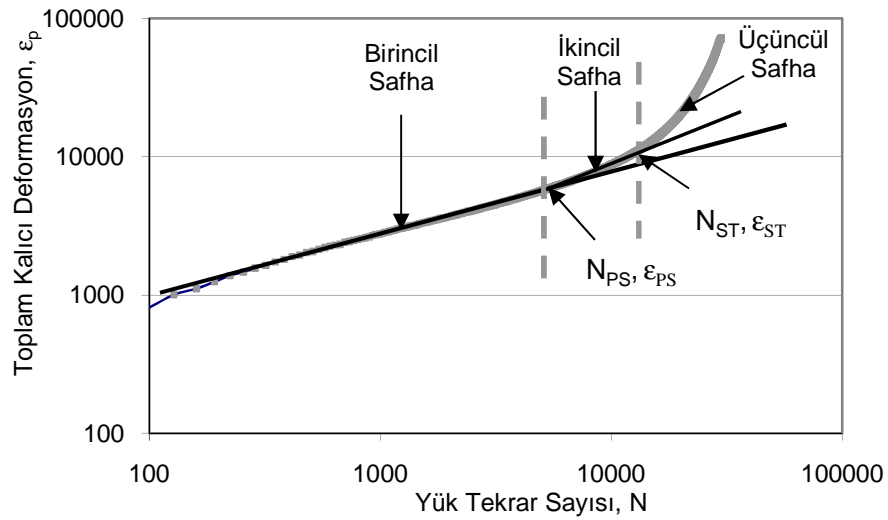
$$\text{İkincil Safha} : \varepsilon_p = \varepsilon_{PS} + c(N - N_{PS}) \quad \rightarrow \quad N_{PS} \leq N < N_{ST} \quad (3.32)$$

$$\text{Üçüncül Safha} : \varepsilon_p = \varepsilon_{ST} + d \left(e^{f(N-N_{ST})} - 1 \right) \rightarrow N \geq N_{ST} \quad (3.33)$$

- ε_p : Toplam kalıcı deformasyon
 N : Yükleme tekrar sayısı
 N_{PS} : İkincil safha başlangıcındaki yükleme tekrar sayısı
 N_{ST}, F_n : Üçüncül safha başlangıcındaki yükleme tekrar sayısı
 ε_{PS} : İkincil safha başlangıcındaki kalıcı deformasyon
 ε_{ST} : Üçüncül safha başlangıcındaki kalıcı deformasyon
 a, b, c, d, e ve f : Tekrarlı yükleme deneyinden belirlenen malzeme sabitleri



Şekil 3.16: Üç Safhalı Kalıcı Deformasyon Eğrisi-Lineer [69]



Şekil 3.17: Üç Safhalı Toplam Kalıcı Deformasyon Eğrisi-Logaritmik [69]

4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞININ ÜÇ EKSENLİ KAYMA PARAMETRELERİ İLE NİTELENDİRİLMESİ

Bitümlü karışım tasarımında, tekerlek izi, çatlama, bozulma ve ayrışma gibi temel kaplama bozulmalarını en aza indirmek amacıyla karışımların mantıksal olarak seçilip ve hazırlanması gerekmektedir. Halen yaygın olarak kullanılmakta olan Marshall gibi ampirik karışım tasarım yöntemleri, sıkıştırılmış karışımların gerçek malzeme özelliklerini ve mühendislik parametrelerini sağlayamazlar. Bu yöntemler yalnızca kabul-red ölçütü olarak kullanılabilir. Diğer taraftan asfalt kaplamaların mantıksal veya mekanik esaslı analizi, ampirik çözümlerinin temelinde olmayan bozulma problemlerine çözümler sunabilmektedir. Sayısal çözümler tekniğinin kullanımının artması, bitümlü karışımların malzeme özelliklerinin belirlenmesini oldukça kolaylaştırmıştır. Bu teknik asfalt kaplama deneyleri ve tasarımında mantıksal-mekanik yaklaşımın temelini oluşturmaktadır.

Genellikle, arazide lastik değme gerilmesi altında oluşan oturmalar ve kalıcı deformasyonları temsil etmek için gerçekleştirilen serbest basınç deneyinde silindirik numunelere basınç modunda düşey gerilme uygulanmaktadır. Fakat bu gerilmeler altındaki davranışlar, asfalt kaplama içinde gerçekte oluşan deformasyonu doğru bir şekilde yansıtmayabilir. Yükleme düzeyi arttığında veya azaldığında, malzemenin fiziksel özelliklerinde sürekli değişimler görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, malzemenin rijitliğini tanımlayan modül veya parametre yüklemeye değiştiğinde sürekli değişimler gösterir. Örneğin, düşük gerilme düzeylerinde basınç gerilmesi, deformasyonla orantılıdır ve belirli bir zaman aralığında biriken kalıcı deformasyonlar ile doğru bir ilişki verir. Yüksek gerilme düzeylerinde ise gerilme şekil değiştirme arasındaki ilişki orantılılığını uzun bir zaman zarfında sürdürmez ve kaplamada kırılma mekanizması ile ilgili olarak değişiklik gösterir. Diğer taraftan bu deney hızlı bir şekilde oluşan deformasyonun her bir şekli ile doğru bir ilişki vermeyebilir. Dolayısıyla, bir kaplama yapısında istenilen bir noktadaki gerilme ve şekil değiştirme büyüklüğü üç eksenli gerilme durumunun doğrudan bir fonksiyonudur. Bu sebeple tek eksenli basınç deneyleri ile kaplamanın hizmet süresinin başlarında akmasına neden olan gerilme durumu tam olarak modellenemez.

Üç eksenli deneyi, özellikle zemin mekaniğinde, yeni bir kavram veya kuramsal bir gelişme değildir. Bu deneyin, bitümlü karışımların dayanımını değerlendirmede uygun olduğu görülmektedir. Zemin mekaniğinde kullanılan üç eksenli deneyi ile farklı yükleme hızları, hücre basıncı ve drenaj koşullarında zemin numunelerinin kayma direnci, gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özellikleri değerlendirilmektedir. Agregada, bitüm ve hava boşluğundan oluşan bitümlü karışımlar, zemin taneleri, su ve havadan oluşan zeminle benzerlik gösterir. Bu açıdan, zemin mekaniğinde kullanılan üç eksenli kayma deneyi kuramının bitümlü karışımlara uygulanması mantıklı görülmektedir. Bununla beraber, asfalt kaplama tasarımında kullanımı, deneyin karmaşıklığı ve standart bir yöntemden yoksunluğu sebebiyle kaplama mühendisleri tarafından çok az kabul görmüştür. 1950'li yılların başlarında yaptığı ilk çalışmalardan bu yana, bitümlü karışımların dayanım deneylerinde üç eksenli kayma mukavemeti deneyi üzerine yayınlanan çalışmaların azlığı bunun kanıtıdır.

Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) kavramlarının bitümlü karışımların tasarımında kullanılma fikri 1950'li yılların başlarında az sayıda araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu yöndeki araştırmalar, yukarıda değinildiği gibi üç eksenli deneyinin gerçekleştirilmesindeki karmaşıklıklar ve kaplama karışımlarının arazideki davranışının deney sonuçlarıyla ilişkilendirilmesindeki zorluklara bağlı olarak sonraki zamanlarda sürdürülememiştir. Günümüzde modern deney aletleriyle, bu engeller ortadan kalkmıştır. Bununla birlikte, geliştirilen kuramlar, etkili hesaplama ve analiz yöntemleri sayesinde c , ϕ ve elastik modül gibi temel malzeme özelliklerini yapısal kaplama tasarımı ve bitümlü karışım tasarımında daha etkili olarak kullanabilmektedir.

Günümüzde, Superpave yönteminde yer alan karışım deneylerindeki zorluklar ve eksiklikler sebebiyle, daha basit ve etkili deney yöntemlerinin belirlenmesine çalışılmaktadır. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi, NCHRP 465 nolu raporda kalıcı deformasyon direncinin belirlenmesi için önerilen basit performans deneyleri arasında yer almaktadır [68].

Bu bölümde, Smith tarafından geliştirilen ve Üç Eksenli Asfalt Enstitüsü yöntemi olarak bilinen ilk performans-esaslı bitümlü tasarım yöntemi kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Aynı zamanda bitümlü karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde üç eksenli kayma mukavemeti deneyine yer veren diğer çalışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan kuramlar üzerinde durulmuştur.

4.1 Üç Eksenli Karışım Tasarım Yöntemi

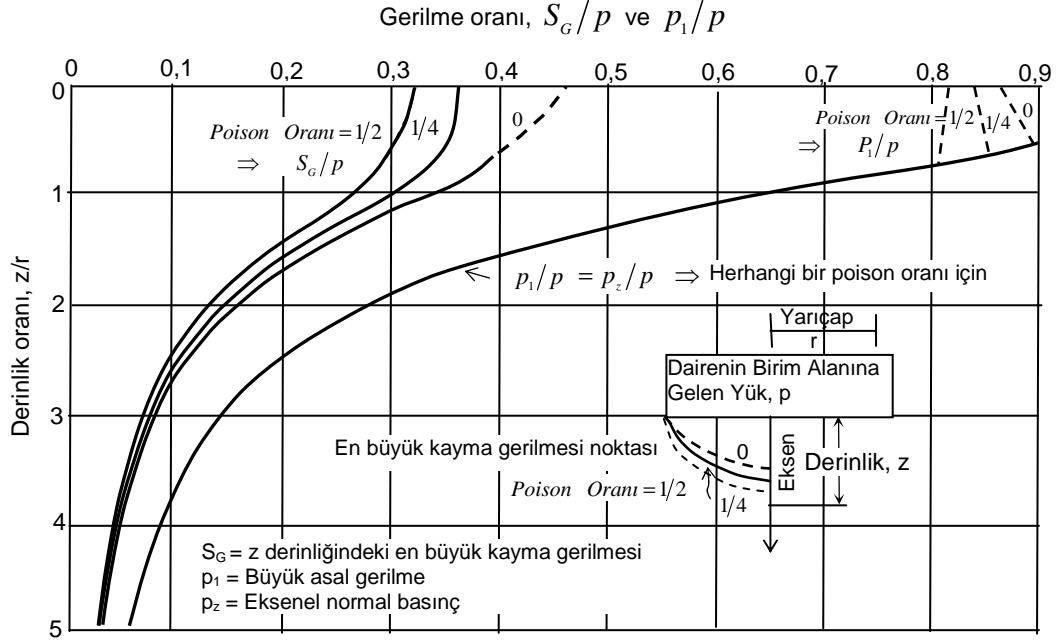
Ampirik yöntemlerdeki başlıca eksiklik bitümlü karışımların arazi performansları ve laboratuvar sonuçları arasındaki korelasyon için gerekli koşulların sınırlandırılmış olmasıdır. Bu önemli olumsuzluğa rağmen, ampirik yöntemlerle tasarlanmış bir çok bitümlü karışım halen yeterli hizmeti vermektedir. Bitümlü karışım tasarım problemlerinde daha rasyonel bir yaklaşıma gereksinim duyulmuştur. Üç eksenli basınç deneyi, Smith tarafından bu yönde atılan ilk adımdır [70].

Bilindiği gibi bir tekerlek yükünün altındaki esnek kaplama bölgesi, etrafını çevreleyen malzeme tarafından desteklenmesi ve yükün doğurduğu sürtünme kuvveti ile çevresel koşullandırmaya (yanal basınca) maruz kalmaktadır. Arazide oluşan bu yanal çevresel destek üç eksenli deneyinde uygulanan hücre basıncıyla benzetilmektedir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyinde eksenel yüklemeye maruz kalan silindirik numune etrafında oluşan yanal destek “koşullandırma” olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi koşullandırılmış karışımların taşıma kapasitesi koşullandırılmamış durumdan daha yüksektir. Bu tip deneyler genellikle plastik davranış gösteren malzeme sınıfı için uygulanmaktadır. Zemin ve bitümlü karışımlar bu sınıfa iyi bir örnek oluşturmaktadır. Bu tür malzemeler yük altında ani bir kırılma göstermemekte, yük uygulandığı sürece akma devam etmektedir.

Bir kaplama karışımında yüke bağlı şekil değiştirme direnci, agregalar arasındaki sürtünme ve bitümlü bağlayıcının kayma direncine bağlıdır. Bu dirençlerden birincisi içsel sürtünme açısı, ikincisi ise kohezyon olarak bilinir. Karışım içerisinde oluşan içsel sürtünme açısının büyüklüğü doğrudan doğruya uygulanan yük ile ilişkilidir. Kayma hızı (yükleme hızı) arttıkça kohezyon değeri de artar.

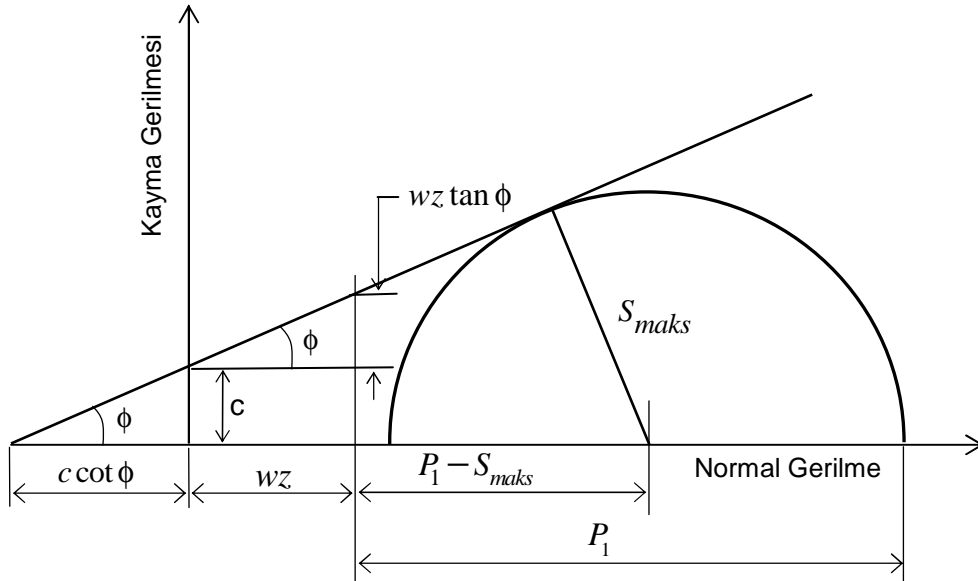
Smith'in bitümlü karışım tasarım alanına en büyük katkısı, arazide inşa edildiğinde stabilliği sağlanan bitümlü karışımlara ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini içeren tasarım abaklarını oluşturmasıdır.

Smith, bitümlü karışım tasarım abaklarının oluşturulmasında, elastisite kuramının kullanılarak düzgün yayılı yüklü dairesel alan altındaki gerilme analizlerinin yapıldığı bir çalışmadan yararlanmışır. Esas alınan bu çalışmada, poisson oranı 0,5 için derinlik oranı Z/R ve gerilme oranları S_{maks} ve P_1/P' 'nin arasındaki ilişkinin gösterildiği Şekil 4.1'de ki abağı oluşturmuşlardır. 0,5 poisson oranına sahip bir malzemenin plastik tabiatlı olduğu ve yük altında hacimsel değişikliğe uğramadığı varsayılmaktadır.



Şekil 4.1: Yarı-Sonsuz Cisim Üzerindeki Düzgün Yayılı Dairesel Yükü Bağlı Oluşan En Büyük Gerilmeler [70]

Kohezyonun belirlenmesi için yayılı yüklü dairesel alanın altındaki herhangi bir noktada aşırı gerilmenin önlenmesi gereklidir. İçsel sürtünme açısı, malzemenin birim ağırlığı ve yük sebebiyle oluşan gerilmenin yer aldığı Şekil 4.2'de ki Mohr diyagramının oluşturulması amacıyla parametrelerin kohezyon ile ilişkileri 4.1'de ki denklem ile ifade edilebilir.



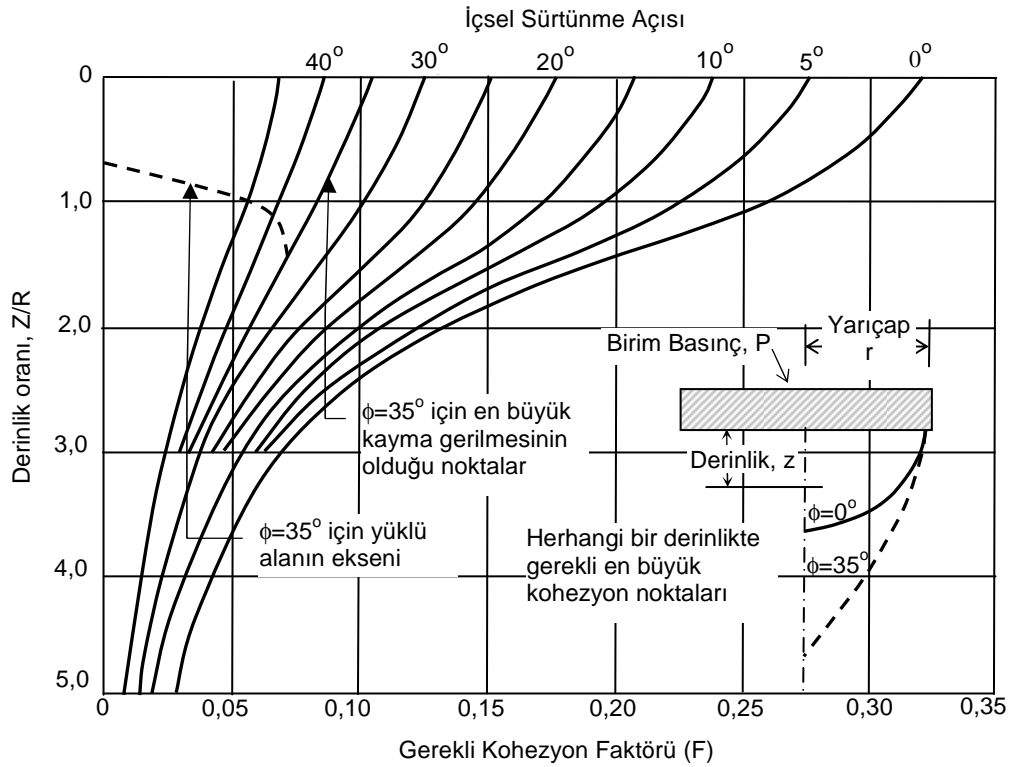
Şekil 4.2: Mohr Diyagramı Üzerinde Gerilme Analizi [70]

Z/R_i derinlik oranları için Şekil 4.1’de verilen S_{maks} ve P_1/P değerleri 4.2 nolu ifadede yerine yazılırsa Şekil 4.3’ü elde etmek mümkündür. Şekil 4.3’te dairesel yüke maruz kalan bir malzemenin istenilen kohezyon faktörü için, farklı içsel sürtünme açısı değerleri ile Z/R arasındaki ilişki verilmiştir. Burada, en büyük kayma gerilmesi yükleme alanının çevresindeki yüzeyde oluşur.

$$C = P \cdot F - w \cdot z \cdot \tan \phi \quad (4.1)$$

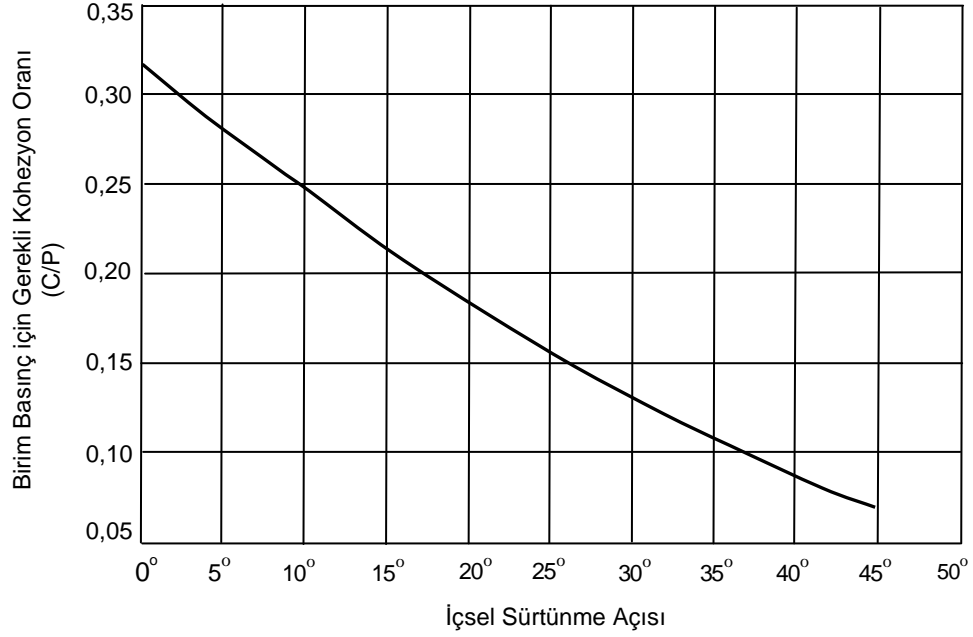
$$F = \frac{S_{maks}}{P \cos \phi} - \frac{(P_1 - S_{maks})}{P} \tan \phi \quad (4.2)$$

- C : Kohezyon
 P : Dairesel alan üzerindeki birim düşey basınç
 w : Malzemenin birim ağırlığı
 z : Alan altındaki derinlik
 ϕ : İçsel sürtünme açısı
 S_{maks} : Problemin olduğu noktadaki en büyük kayma gerilmesi
 P_1 : Problemin olduğu noktadaki büyük asal gerilme



Şekil 4.3: Düzgün Yayılı Dairesel Yük Altındaki Malzemenin Kohezyon Değerinin Belirlendiği Grafik [70]

Yukarıdaki ifade kaplama karışım tasarımı ile ilişkilendirildiğinde, derinlik oranı $Z/R = 0$ 'dır. Kohezyon faktörü (F), farklı içsel sürtünme açısı değerleri için dikkate alındığında $Z/R = 0$ değerinde C/P 'ye eşittir. Şekil 4.4'te yüzeydeki aşırı gerilmeyi önlemek için, gerekli birim basınç C/P ile kohezyon oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki oluşturulmuştur. 25° 'lik bir içsel sürtünme açısı değerine sahip olan bir malzemede kayma kırılması oluşmaması için minimum kohezyon değeri uygulanan basıncın 0,15 katına eşit olmalıdır. Şekil 4.4'te gösterilen ilişkinin daha kullanışlı bir formu olarak, uygulanan farklı gerilmeler için içsel sürtünme açısı ve kohezyon arasındaki ilişkinin görüldüğü Şekil 4.5 önerilmiştir.

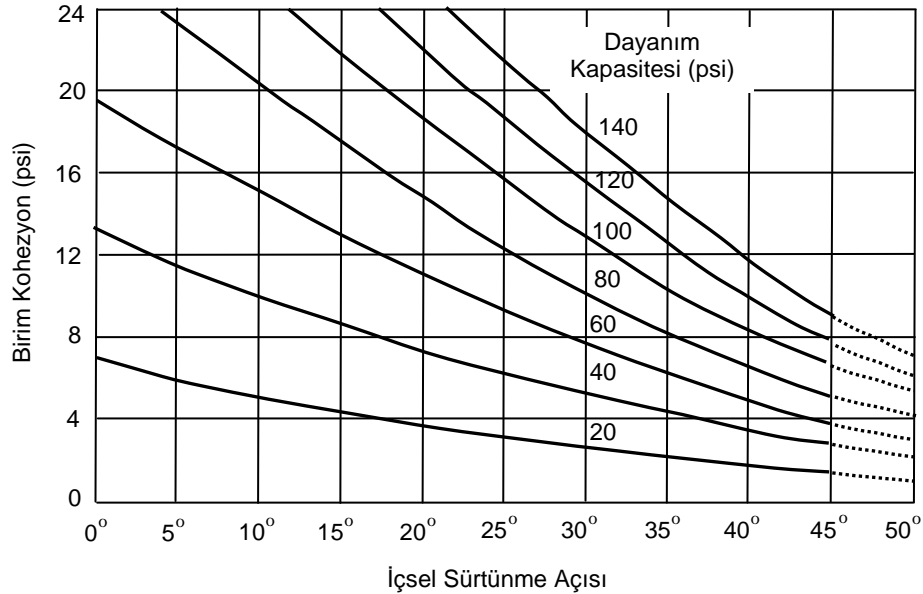


Şekil 4.4: Farklı İçsel Sürtünme Açılarında Yüzeydeki Aşırı Gerilmeyi Önlemek için Gerekli Kohezyon Değerleri [70]

Bu tasarım prosedürünün bir sonraki aşamasında, arazideki performansları bilinen birçok kaplama karışımı kapalı sistem üç eksenli hücresinde test edilmiştir. Bu deneyler arasından, Şekil 4.5'te 100 psi eğrisinin yakını ve üzerindeki değerlerin temsil ettiği ağır trafik altında arazideki performansları yeterli olan bitümlü karışımlar belirlenmiştir. Bu abakta, içsel sürtünme açısı ve kohezyonun bir fonksiyonu olarak arazideki tipik tekerlek basınçlarını temsil eden farklı normal gerilme koşulları belirtilmektedir. Kaplama yüzeyine uygulanan değme basıncının 100 psi alınması mantıklı görüldüğünden, yeterli ve yetersiz asfalt betonu karışımlar arasındaki ayırım çizgisi olarak 100 psi eğrisi seçilmiştir. Buna göre, 100 psi çizgisinin üzerinde kalan içsel sürtünme açısı ve kohezyonlu karışımlar stabil, bu çizginin altına düşen karışımlar ise stabil olmayan veya başka bir deyişle yüksek plastik deformasyonlara uğrayan karışımlar olarak sınıflandırılmaktadır.

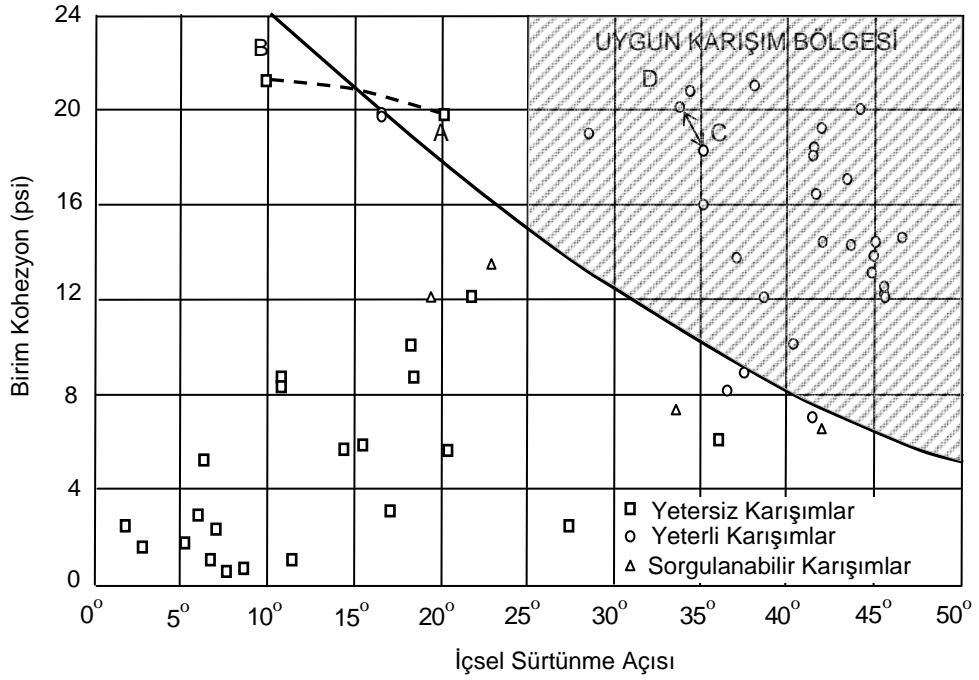
Laboratuarda üretilen numunelerin kullanıldığı deney yönteminin doğruluğu, arazide sergiledikleri performans ile kanıtlanmıştır. Üretilen numunelerden 100 psi çizgisinin üzerinde kalanların plastik deformasyon göstermediği ve çizgi altında kalan numunelerin plastik kırılmaya uğradığı vurgulanmaktadır.

Bununla beraber arazideki gözlem sonuçları, laboratuardaki dayanımları yeterli olan bazı karışımların yapımından kısa bir süre sonra bozulmaya uğradığını göstermiştir. Bunun sebebi, trafik altında karışımların sıkışması ve boşlukların bitümlle dolmasının içsel sürtünme açısında yaptığı azalma olarak belirlenmiştir. Bu durumun örneği, Şekil 4.6 incelendiğinde gözlenebilir. Bir karışımın A noktasıyla temsil edilen özellikleri ağır trafik altında B noktasına dönüşebilir. Bu azalma, başlangıç içsel sürtünme açısı 20° veya daha az olan karışımlarda özellikle fark edilecektir. Bundan dolayı, 100 psi dayanım-kapasite çizgisi ile içsel sürtünme açısının 25° olduğu çizginin sağında kalan bölge, kabul edilebilir karışım bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu bölgedeki C noktası ile temsil edilen bir özellik kombinasyonu ağır trafik altında yalnızca D noktasına değişebilir. %4 ve daha az hava boşluğu miktarına sahip karışımlar B noktası tarafından temsil edilmektedir. C noktası tarafından temsil edilen karışımlar ise %4'ten daha yüksek hava boşluğuna sahiptir.



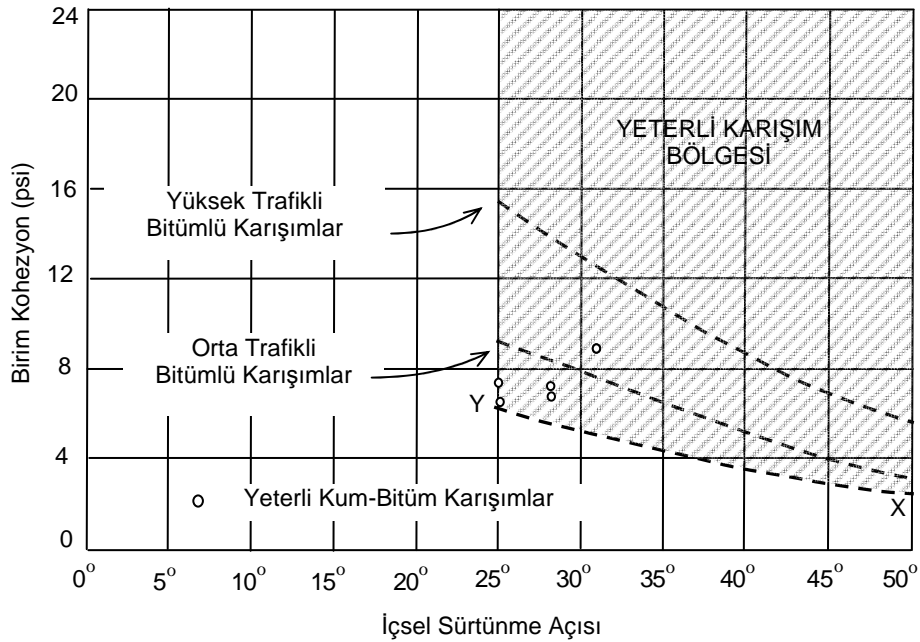
Şekil 4.5: Farklı Dayanım Kapasitelerindeki Üç Eksenli Kayma Parametreleri [70]

Tüm kaplama yüzeyleri, ağır ve yoğun tekerlek yüklerine maruz kalmamaktadır. Dolayısıyla, bu değerlendirme abağı, trafik miktarı az ve ağır tekerlek yüklerinin seyrek olduğu ikinci derece yollar için modifiye edilmiştir. Bu yönde hazırlanan Şekil 4.7'de 100 psi-dayanım kapasite çizgisi aşırı trafik hacmi ve ağır trafik altındaki asfalt kaplamalar için alt limiti temsil eder.



Şekil 4.6: Bitümlü Karışımlar İçin Değerlendirme Abağı [70]

60 psi dayanım kapasite çizgisi ağır veya orta derecede trafiğe maruz kalan plant-mix yollar için alt limiti temsil eder. 40 psi dayanım kapasite çizgisi ikinci derece yol sistemlerindeki alt sınırı temsil eder. Şekil 4.7'de sunulan diğer iki limit deneyimine dikkat çekilmesi gereken bir husus, sözü edilen karışım tipleri için arazi performansları ile ilgili bazı veriler toplanarak bu limitler üzerinde yapılacak düzenlemeler ile daha gerçekçi hale getirilebileceğidir.



Şekil 4.7: Farklı Trafik Koşulları İçin Değerlendirme Abağı [70]

Üç eksenli tasarım yöntemi, bu dayanım abakları yanında agrega hacim özgül ağırlığına dayanan toplam karışımdaki hava boşluğunun %5–10 arasında olması ölçütünü kapsar. Değerlendirme abağı en büyük boyutu 25 mm olan agrega içeren ve penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı kullanılan yoğun tane dağılımlı kaplama karışımları için sınırlandırılmaktadır.

Smith yönteminde, farklı bitüm yüzdelerinde bir grup deney numunesinin hazırlanması gerekmektedir. Uygun miktarda agrega ve bitüm, tavsiye edilen sıcaklıkta karıştırılır. Bu karışım yaklaşık 101,6 mm çapında ve 203,2 mm yüksekliğinde bir numune elde edecek şekilde önceden ısıtılmış kalıp içerisine yerleştirilir. Kalıp içerisinde şişlenen karışım çift taraflı sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılır. Uygun bir zaman aralığında beklenildikten sonra yük kaldırılır, numune kalıptan çıkarılır ve soğumaya bırakılır.

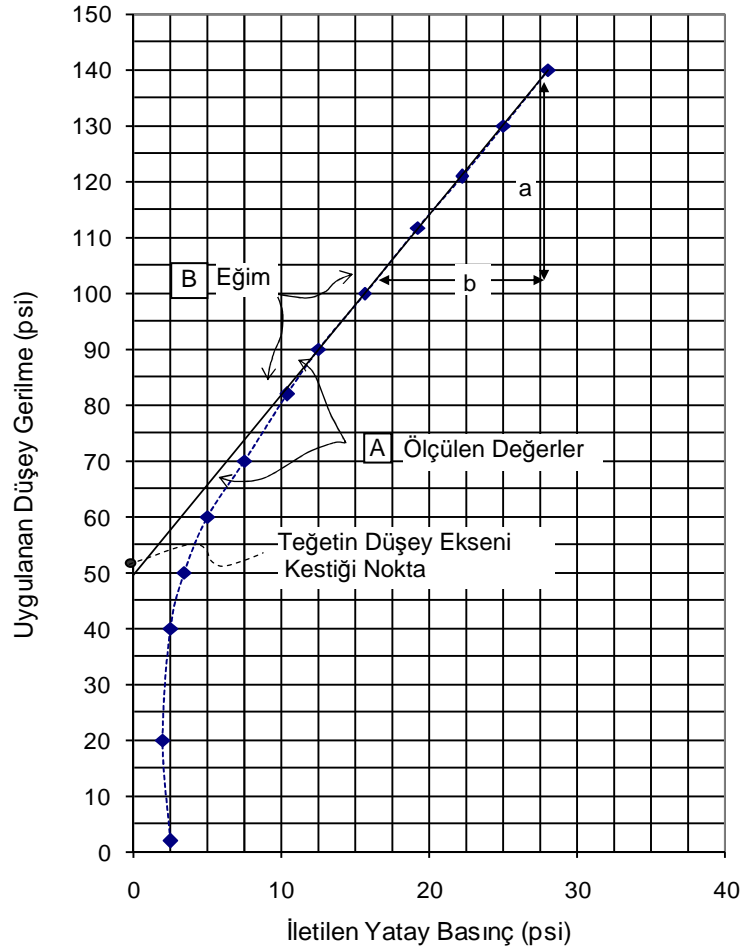
Üç eksenli deneylerinin yürütülmesinde iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, açık sistem olarak bilinir. Bu yöntemde, üç eksenli hücrenin içerisine yerleştirilen numuneye sabit bir hücre basıncı uygulanır ve bu koşullar altında basınç gerilmesi belirlenir. Mohr kırılma zarfının belirlenmesi için gerekli verilerin elde edilmesinde, iki veya daha fazla numuneye kırılana değin deney uygulanmaktadır. Açık sistem üç eksenli deney sonuçlarının, kapalı sisteme dayanılarak oluşturulan Şekil 4.6'daki abağa uygulanmasında dikkatli olunmalıdır. Çünkü iki deney tipinin yükleme oranları arasında büyük farklılıklar ortaya çıkabilir.

Üç eksenli deneyinin yürütüldüğü ikinci yöntem, kapalı sistem olarak adlandırılır. Bu yöntemde, hücre içerisinde sıvıyla sınırlandırılan numuneye düşey bir yük uygulanır. Bu yükleme, koşullandırma sıvısı içerisinde bir basınç oluşmasına sebep olan yatay şekil değiştirmeler oluşturur. Düşey gerilmedeki sabit artışlar için, koşullandırma sıvısında oluşan yatay basınçlar ölçülür. Bu değerler kullanılarak Şekil 4.8'de görülen eksenel gerilme-yanal basınç eğrisi çizilir. Bu eğrinin doğrusal kısmına çizilen teğetin eğimi 4.3'teki eşitlikte görüldüğü gibi içsel sürtünme açısıyla ilişkilidir.

$$Eğim = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.3)$$

Kohezyon (c)'nin çizilen teğetin düşey gerilme eksenini kestiği nokta ile olan ilişkisi 4.4 nolu eşitlikte verilmiştir.

$$Düşey Eksendeki Arakesit = 2c \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.4)$$



Şekil 4.8: Kapalı-Sistem Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuç Eğrisi [70]

Bu deneyde numune, deformasyon hızı 0,025 mm/dk (0,001 inç/dk)'dan daha az olacak şekilde deformasyon kontrollü bir düşey yüke maruz bırakılır. Aynı zamanda düşey yük ve oluşan yatay basınç kaydedilir. Şekil 4.8'deki grafiği oluşturabilecek yeterli sayıda nokta elde edinceye kadar deneye devam edilir. Açık-sistem ile kıyaslandığında kapalı-sistem üç eksenli deneyi, daha az sayıda numune gerektirir ve deneyde sıcaklığın etkilerini en aza indirecek deney koşulları uygulanır. Deformasyon oranının 0,025 mm/dk'dan daha az olması, bağlayıcının direnci üzerinde sıcaklığın etkilerini pratikte sıfıra kadar azaltmaktadır. Hem sıcaklık hem de şekil değiştirme oranının, bitümlü bağlayıcının kayma deformasyon direnci üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Böylelikle şekil değiştirme oranı sıfır olduğunda sıcaklığın etkisi oluşmadığı varsayılmaktadır.

Üç eksenli basınç deneyinin yürütülmesinde, numunenin hacim ağırlığı havada ve suda tartma yöntemiyle belirlenir. Bu yöntemde agreganın hacim özgül ağırlığı kullanılarak karışımın hava boşluğu yüzdesi hesaplanır.

Deneyden elde edilen veriler Şekil 4.8’de ki formda çizildikten sonra, kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplanır ve Şekil 4.6’daki değerlendirme abağı üzerine işaretlenir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin temsil ettiği nokta abak üzerinde yeterlilik alanına düşerse ve toplam karışımın hava boşluğu yüzdesi %5 ile %10 arasında ise karışım yeterlidir. Eğer nokta, abak üzerinde yeterli bölgenin dışında kalırsa, ya agrega tane dağılımını ya da bitümlü bağlayıcı yüzdesini veya her ikisini değiştirmek gereklidir. Aynı ölçütü sağlayan birden fazla karışım arasından bitümlü bağlayıcı yüzdesi en yüksek olan seçilmelidir.

4.2 Bitümlü Karışımlarda Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Uygulamaları

Asfalt kaplama tasarımında kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) kavramlarının uygulanması 1950’li yılların başlarında etkin bir çalışma alanıydı. Fakat araştırmacılar Marshall deneyine nazaran daha karmaşık ve maliyetli olan bu deneyin uygulamacılar arasında rağbet görmemesi sebebiyle bu alandaki çalışmalarını sürdürmemişlerdir [9]. Fakat son zamanlarda bitümlü karışımlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar arasında üç eksenli kayma mukavemeti deneyine yer verildiği görülmektedir. Bu konuyla ilgili çok fazla çalışma bulunmamakla birlikte, çoğunluğunun 1950 yıllara dayandığı çalışmalardan aşağıda özetle bahsedilmektedir:

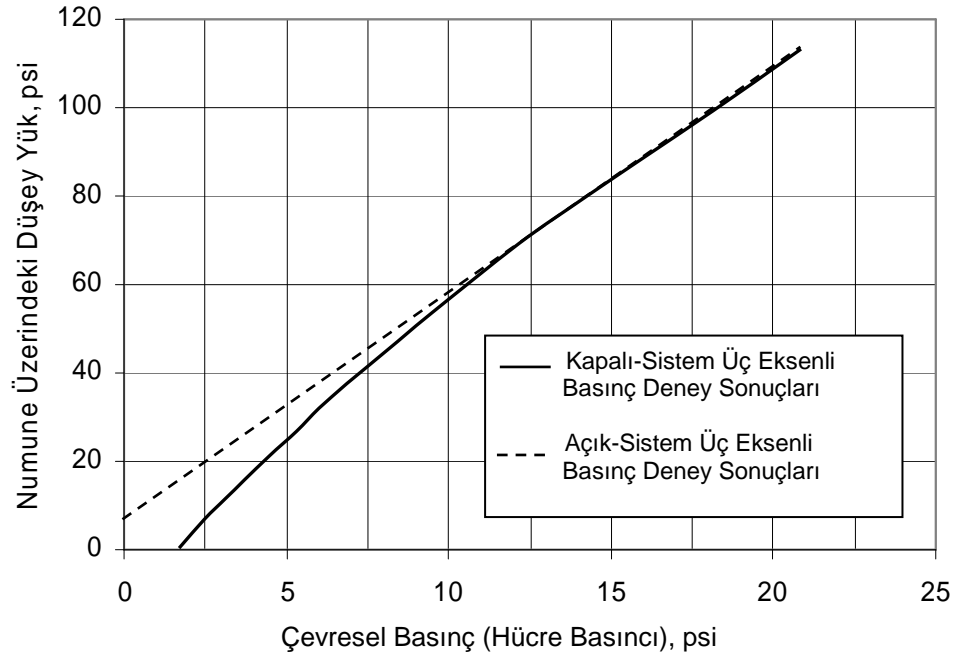
❖ Endersby (1951), bitümlü karışımların kayma direncinin ölçülmesinde üç eksenli deneyini kullanan ilk araştırmacılardan birisidir. Geleneksel bitümlü karışımların ve kuru agreganın Mohr daireleri arasında bir karşılaştırma yapmış ve kayma direnci üzerinde bağlayıcının etkisini incelemiştir [71]. Ayrıca, kayma direnci gibi gerilme parametreleri üzerinde numunenin boyut etkisi araştırılmış ve yükseklik-çap oranını arttırdığında Mohr dairelerinin daha parabolik olduğunu ve kayma direnci üzerinde daha büyük oranda değişiklik sergilediğini gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar, içsel sürtünme açısı, yoğunluk ve nihai boşluk içeriğiyle gösterilen stabiliteye dayanmaktadır. Çalışma sonuçlarında yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlanan numunelerin maksimum yoğunluk ve minimum hava boşluğuna sahip olduğu, dolayısıyla bitüm yüzdesi değişimine karşı daha hassas karışımların elde edildiği belirtilmektedir. Statik sıkıştırıcı ile %5-6 bitüm yüzdesinde hazırlanan numunelerin bitüm miktarı değişimine karşı hassas olmadığı ve deformasyon dirençlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bununla beraber, yoğurmalı sıkıştırıcının arazideki sıkıştırmayı en iyi yansıtan yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

❖ Üç eksenli deneyi kullanarak kayma direncinin belirlendiği diğer bir çalışmada Hveem ve Davis tarafından gerçekleştirilmiştir [72]. Üç eksenli deneyinin mantığını kullanarak bitümlü karışımların kayma direncini ölçmek için bir stabilometre aleti

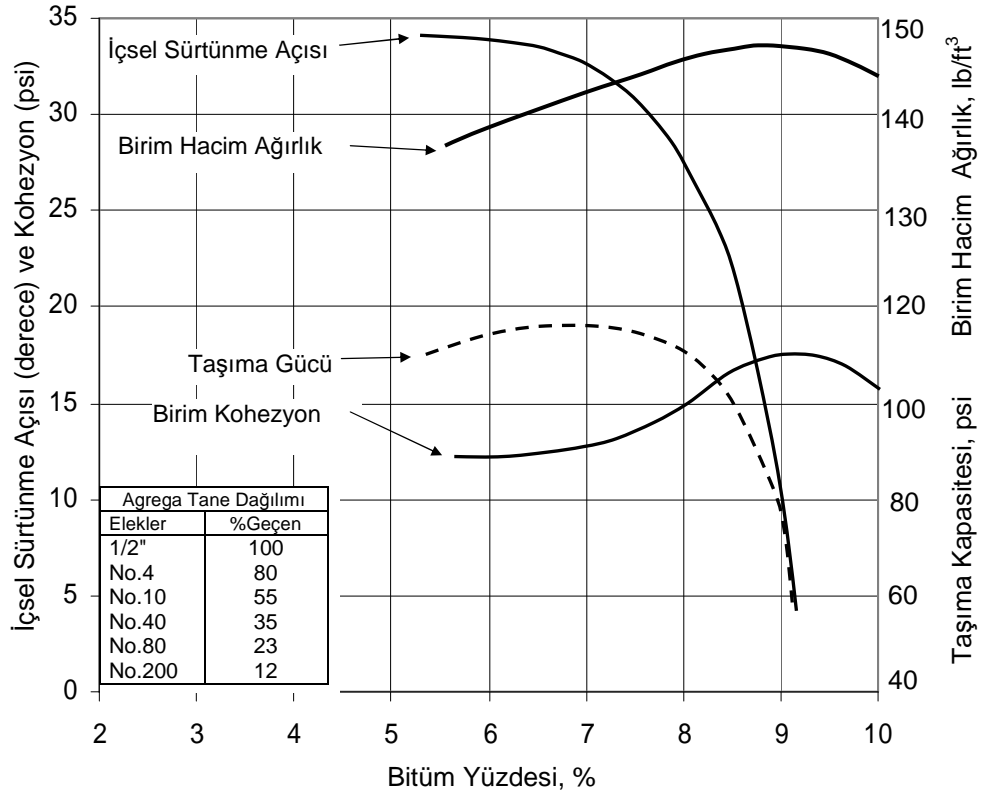
geliştirmişlerdir. Bu deneyde, laboratuarda üretilen karışım numunesi hücre içerisindeki akışkandan yalıtılmak için lastik bir membran içerisine yerleştirilir, düşey basınç uygulanır ve akışkan içerisinde oluşan yatay basınç ölçülür. Stabilitenin uygulanması düşey basınç altında yatay deformasyona karşı direncin ölçülmesi olarak tanımlanmaktadır. Stabilitenin değeri, normal basınç ve yatay basınç arasındaki farka bağlıdır. Stabilitenin endeksi, deviyör gerilmenin ölçülen yatay gerilmeye oranı olarak hesaplanır. Düşük yatay basınçlar düşük plastik deformasyon potansiyelini ve yüksek kayma direncine sahip karışımları ifade etmesine karşılık, yüksek yatay basınç karışımların düşük kayma direncine ve yüksek deformasyon potansiyeline sahip olduğunu ifade etmektedir. Çalışmada, stabilite değerleri üzerinde numune hazırlanmasının önemi ve arazideki sıkışmanın en iyi yoğunluk sıkıştırıcısının kullanarak yansıtılabildiği vurgulanmaktadır.

❖ Smith tarafından, kapalı-sistem sonuçlarını ve geleneksel açık-sistem üç eksenli deneylerini karşılaştırmak için bir seri deney gerçekleştirilmiştir [73]. Şekil 4.9' da görüldüğü üzere, yüksek hücre basınçlarındaki açık-sistem üç eksenli deney sonuçları, kapalı-sistem üç eksenli deneylerindeki yatay basınç artışıyla iyi bir uyum içerisindedir. Bu sonuç, yüksek çevresel basınçlarda, kayma direnci üzerindeki çevresel basınç (hücre basıncı) türünün (açık-sistem veya kapalı-sistem) ihmal edilebileceğini göstermektedir. Aynı çalışmada kohezyon, birim hacim ağırlık ve nihai gerilmenin bir fonksiyonu olarak bağlayıcı içeriğinin içsel sürtünme açısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kohezyon değerlerinin numunelerin birim hacim ağırlıklarındaki artışa paralel olarak arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, içsel sürtünme açısı ve nihai gerilme önemli ölçüde azalmıştır. Kohezyon ve yoğunluk ölçümlerine dayalı bir yöntemin gerilmenin doğru tahminini vermediği sonucuna varmıştır. Bulgular Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

❖ Mcleod ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, bitümlü karışımların mukavemet ve stabilitesinin belirlenmesinde üç eksenli basınç deneyi ve Mohr diyagramının kullanımının niceliksel terimlerle taslağı çizilmiştir [74]. Bu çalışma, yüklü alana komşu olan kaplama malzemesi tarafından oluşturulan yatay desteklerin miktarının hesaplanması için bir yöntem içermektedir. Çalışmada, bitümlü karışımların stabilitesi üzerinde bağlayıcının viskoz direncinin etkisi tarif edilmektedir. Kaplama ve tekerlek, kaplama ve temel tabakası arasındaki sürtünme direncinin asfalt kaplamaların stabilitesi üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. Bitümlü karışımların tasarımında kırılma gerilmesinin etkisi göz önüne alınmaktadır. Çalışma, stabilite denklemleri ve tasarım diyagramını içermektedir.



Şekil 4.9: Bitümlü Karışımlar Üzerinde Gerçekleştirilen Açık ve Kapalı Üç Eksenli Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması [73]



Şekil 4.10: Bitüm İçeriğinin Bir Fonksiyonu Olarak Gerilme Özellikleri [73]

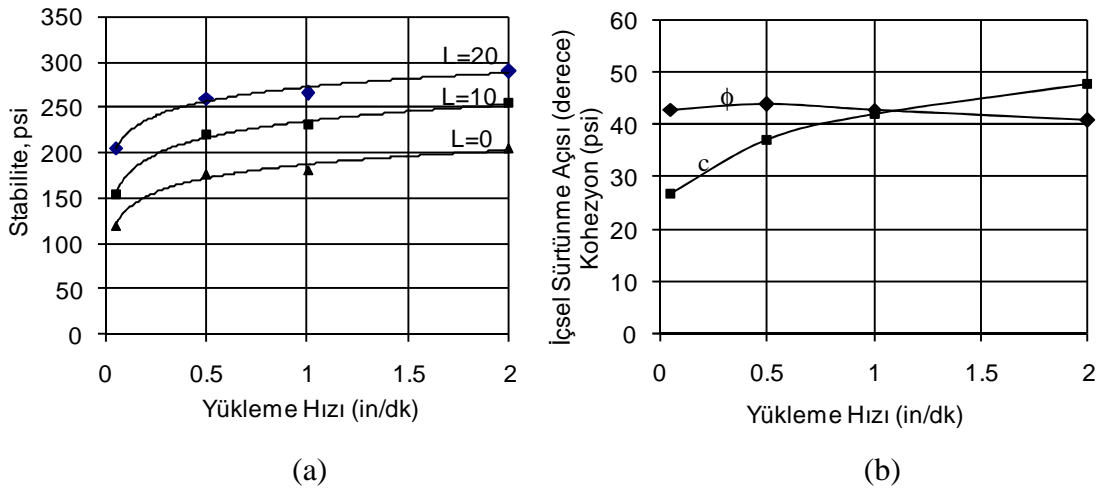
❖ Oppenlander ve Goetz tarafından gerçekleştirilen laboratuvar araştırmasının amacı, bitüm-agrega karışımlarındaki kayma direncinin iyileşmesine katkıda bulunan temel etkenlerin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktır [75]. Bu çalışmada süreksiz tane dağılımlı ve tek boyutlu olmak üzere iki türlü agrega tane dağılımı kullanılmıştır. Bu kaplama tiplerinin seçilmesinin sebebi, bu karışımların hizmet koşullarında iyi bir performansa sahip olması yanında, süreksiz tane dağılımlı karışımların geleneksel deney yöntemleri ile değerlendirildiğinde yeterli stabiliteyi sağlamamasıdır. Agrega tane dağılımı yanında hücre basıncı (0–150 psi), numune yüksekliği, agrega türü ve bitüm içeriği gibi değişkenlerde dikkate alınmıştır. Yüksek hücre basıncındaki üç eksenli stabilitesine numune yüksekliğinin etkisini ölçmek üzere yükseklik çap oranı ikiden daha düşük numuneler de üretilmiştir. Araştırmanın bu safhası irrasyonel üç eksenli deneyi olarak gösterilmiştir. Rasyonel ve irrasyonel üç eksenli deneyinde de, açık tane dağılımlı karışımlar Coulomb denklemiyle doğru orantılı gerilme özellikleri sergileyen açık tane dağılımlı karışımlar kohezyon ve içsel sürtünme açısıyla temsil edilebilmiştir. Buna karşılık irrasyonel deneylerde rasyonel üç eksenli deneylerine göre daha yüksek kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Tek boyutlu tane dağılımına sahip karışımlarda hücre basıncı ve normal gerilme arasında eğrisel bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple tek boyutlu karışımların kayma gerilmesi kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi sabitlerle tamamen doğrulanamamıştır. Kırılmış kireçtaşı agrega ile üretilen numunelerin, çakıl ve doğal kuma göre daha yüksek bir üç eksenli mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında, tüm karışımlar için en büyük normal gerilme değerinin hücre basıncının büyüklüğüne bağlı olduğu belirlenmiştir.

❖ Nijboer, kapalı-sistem üç eksenli sistemini kullanarak agrega-bitüm ve kum-bitüm karışımların mukavemet ve hacimsel karakteristiklerini etkileyen parametreleri incelemiştir [76]. Test edilen kum-bitüm karışımların, dayanım ve hacim değişikliği davranışları üzerinde agrega türü, bağlayıcı yüzdesi, şekil değiştirme hızı ve normal gerilmenin etkilerini rapor etmiştir. Bitüm yüzdesi ve agrega türü ne olursa olsun içsel sürtünme açısının şekil değiştirme hızı ve normal gerilmeden bağımsız olduğunu belirlenmiştir. Bu çalışmada, deneyler 1/500 ve 1/125 inç/dk şekil değiştirme hızlarında uygulanmıştır. Süreklilik durumu ve akma safhasındaki içsel sürtünme açısının değişimi için karşılaştırma yapılmıştır. Bulgular akma anında süreklilik durumuyla karşılaştırıldığında normal gerilme artarken içsel sürtünme açısında çok az bir azalma olduğunu göstermektedir. Aynı normal gerilme aralıklarında test edilen kuru agrega numunelerinde benzer bir davranış gözlenmiştir. Deneysel verilere dayanarak yüksek bitüm yüzdelerinde dayanım kaybının olduğu ifade edilmektedir. Bitüm yüzdesi arttığında Mohr-Coulomb zarfının normal gerilme ekseninin altına düştüğü vurgulanmaktadır. %2–3 boşluk miktarının altında agrega

karışımlarında kum karışımlarından daha hızlı bir azalma görülmektedir. Sonuç olarak, kritik boşluk oranına yaklaşıldığında içsel sürtünme açısının değiştiği belirlenmiştir. Dayanım kaybının muhtemel iki sebebi, aşırı bitüm yüzdesinin agregaların değme noktaları arasında yağlanma etkisini başlatması ve içsel sürtünme açısının düşmesi veya boşluk içeriğinin kritik oranların altına düşmesiyle bitümlü bağlayıcı içindeki hidrostatik boşluk basıncının artışı olarak belirtilmektedir.

❖ Akili tarafından bitümlü karışımların gerilme özelliklerinin belirlenmesinde geleneksel üç eksenli düzeneğini kullanılmıştır [77]. Hazırlanan silindirik bitümlü karışım numuneleri üç farklı hücre basıncı ve üç bağlayıcı yüzdesinde test edilerek kayma gerilmesi ve young modülleri belirlenmiştir. Çalışma bulguları bitümlü bağlayıcı içeriğindeki azalmanın, kayma gerilmesi ve young modüllerinde artışla sonuçlandığını göstermektedir. Yüksek bitüm yüzdesinde gerilmede oluşan bu azalma, yumuşama davranışıyla ilişkili olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, bazı ilişkilerin kesinleştirilmesinde üç eksenli deneyinin yumuşama evrelerinde gerçekleştirilmesinin (farklı sıcaklıklarda) gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

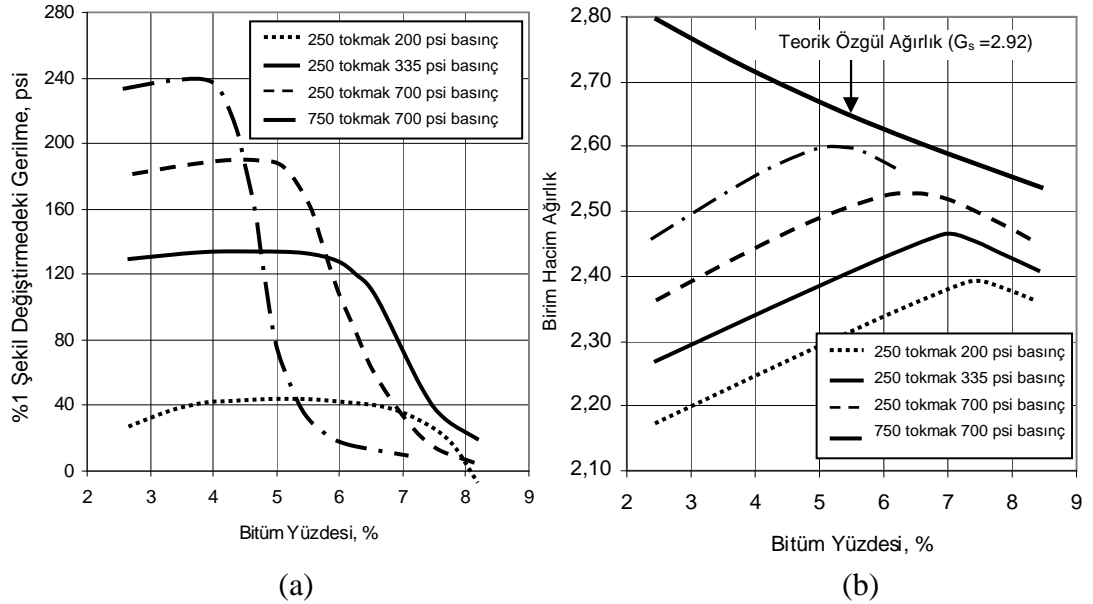
❖ Goetz ve Chen tarafından üç eksenli kayma gerilmesi deney yönteminin bitümlü karışımların temel gerilme özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanımı araştırılmıştır [78]. Bu çalışmada halen kullanılan çeşitli üç eksenli kayma deneyi usulleri arasında karışım tasarım yöntemi ve araştırma aleti olarak üç eksenli deneyinin durumu özetlenmiştir. Üç eksenli kayma deneyi verilerinden elde ettikleri bulgulara göre Şekil 4.11’de görüldüğü gibi içsel sürtünme açısının şekil değiştirme hızından etkilenmediği, şekil değiştirme hızındaki artışla kohezyon değerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.11: Bitümlü Karışımların Üç Eksenli Kayma Parametrelerinin Yükleme Hızı ile Değişimi: (a) Stabilite (b) İçsel Sürtünme açısı ve Kohezyon [78]

❖ Hewitt tarafından esnek kaplamaların tasarımı ve analizi için, trafik yüklerinin kaplamada oluşturacağı yatay gerilme terimine dayalı bir yöntem geliştirildi [79]. Bu prosedürdeki kayma gerilmesi parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı, esnek kaplama malzemeleri için üç eksenli ve direkt kayma deneyi verileri ile oluşturulan gerilme zarfından elde edilmiştir. Bu parametrelerin kaplama malzemelerinin deformasyon direncini büyük oranda ifade ettiği vurgulanmıştır. Bu yöntemin bitümlü karışımların stabilite analizinde ve kaplama kalınlığı tasarımında uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

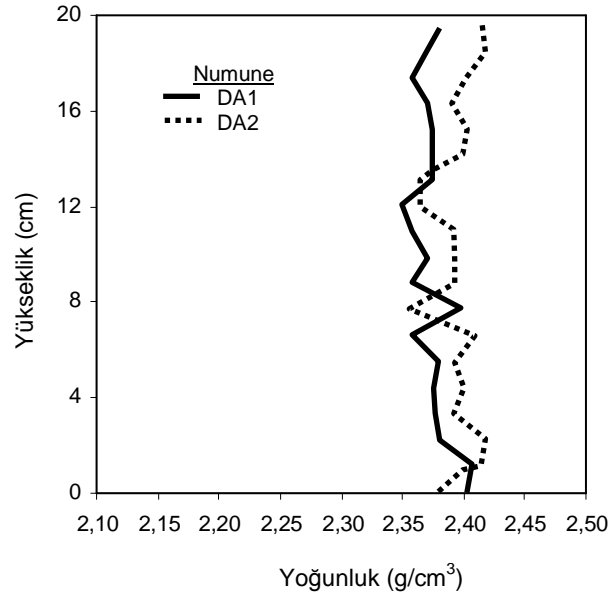
❖ 1956'da Monismith ve Vallergera bitümlü sıcak karışımlar üzerinde üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir [80]. Deney numunelerini üç farklı sıkıştırma enerjisi kullanarak kneading kompaktör ile hazırlamışlar ve bitümlü bağlayıcı miktarını değiştirmişlerdir. Deney numuneleri 60 °C'de ve 138 kPa (20 psi) hücre basıncında test edilmiştir. Deney yöntemi, numune kırılıncaya değin 1,27 mm/dk (0,05 inç/dk) deformasyon hızında yüklemeyi ön görmektedir. Şekil 4.12'de %1 şekil değiştirmedeki kayma gerilmesi ve buna karşılık gelen birim hacim ağırlıklar gösterilmektedir. Bu şekilde belli bir bitüm yüzdesi değerinden sonra kayma gerilmesi değerinin azaldığı gözlenmektedir. Bitümlü sıcak karışımların stabil halden stabil olmayan hale döndüğü pik kayma gerilmesine karşılık gelen nokta optimum bitüm yüzdesi olarak dikkate alınmıştır. Bu olgu, belirli aralıktaki su muhtevalarında zemin üzerinde yapılan üç eksenli deneyine benzemektedir.



Şekil 4.12: Farklı Sıkıştırma Basınçları için (a) %1 Şekil Değiştirmedeki Gerilme ve (b) Birim Hacim Ağırlık Değerlerinin Bitüm Yüzdesi ile Değişimi [80]

❖ Bir grup araştırmacı tarafından bitümlü karışımların üç eksenli davranışı, üç eksenli deney sonuçları ile Marshall deney sonuçları arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve $c-\phi$ parametrelerinin kaplama tasarımında kullanılmasına yönelik bir dizi çalışma gerçekteşirilmiştir [10, 12, 81, 82].

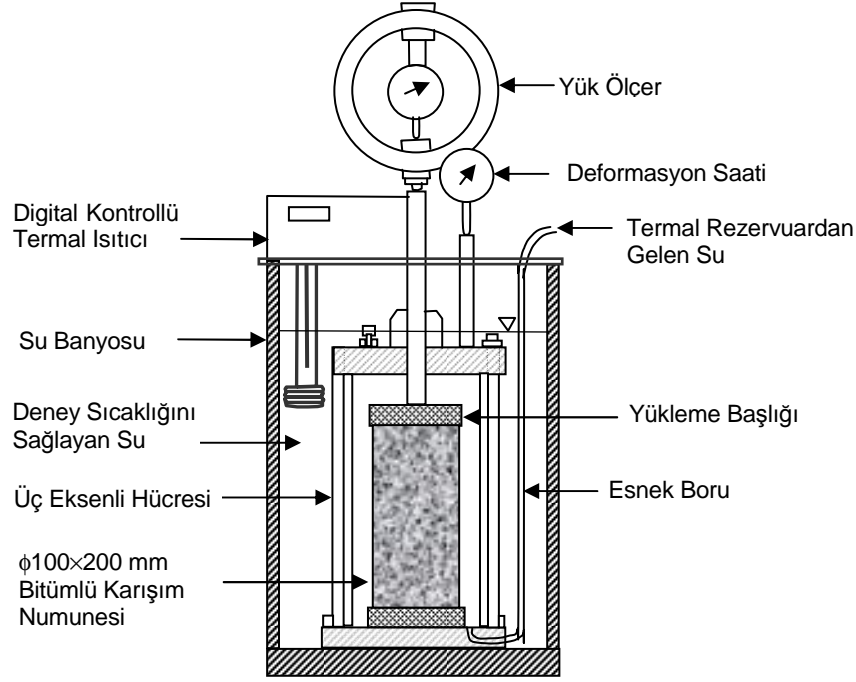
Bu çalışmalarda, aynı numune hazırlama ve üç eksenli deney düzeneği kullanılmıştır. Araştırmacılar, 102 mm çapında ve 200 mm yüksekliğindeki numunelerin hazırlanmasında, en iyi sıkıştırma yönteminin belirlenmesi için yürüttükleri kapsamlı bir çalışmayı referans almışlardır [83]. Marshall kompaktörü ve yoğurmalı sıkıştırıcı ile tabakalı ve tek tabakada sıkıştırılan numunelerin üniform şekilde hazırlanmasının mümkün olmadığının anlaşıldığı bu çalışmada, en iyi sıkışmanın çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemle tek tabaka halinde sıkıştırılan numuneler boyunca yapılan nükleer yoğunluk ölçümlerinde şekil 4.13' de görüldüğü gibi üniform bir yoğunluk profili elde edilmiştir. Bu sıkıştırma yönteminde, gevşek karışımın kalıp içerisine yerleşmesi için uygulanan 1 MPa'lık ön basınçtan sonra numune 20 dk süreyle 25 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır.



şekil 4.13: Çift Taraflı Statik Sıkıştırma Yöntemiyle Hazırlanan 200 mm Yükseklikli Numunelerin Yoğunluk Profili [83]

Bahsedilen çalışmalarda, şekil 4.14'te şekli verilen üç eksenli hücre kullanılmıştır. Bu hücre zemin mekaniği deneylerinde kullanılan geleneksel üç eksenli hücrenin sıcaklık kontrol sistemi ile modifiye edilmiş halidir. Hücrenin tamamı, deney sıcaklığı olan 60 °C'nin 3-5 °C üzerinde ayarlanan sıcaklık kontrollü su banyosu içerisine yerleştirilmektedir. Üç eksenli numuneler, yükleme plakaları arasına yerleştirilmiş ve numuneler üzerine geğirilen lastik membran ve O-ringler ile sudan yalıtılmıştır. Termal rezervuarda istenilen deney sıcaklığına kadar ısıtılan su, hücre

içerisine transfer edilerek numuneye gerekli yanal basınçlar sağlanmıştır. Numuneler test edilmeden önce, orta noktasında sıcaklığın 60 °C'ye ulaşması için yaklaşık bir saat beklenmiştir. Her bir parametre için 0-400 kPa arasında en az 4 farklı hücre basıncı uygulanmıştır. Her bir hücre basıncında denenen numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Farklı deney sıcaklıkları ve yükleme hızlarındaki bitümlü karışımların kohezyon ve içsel sürtünme açıları, uygulanan hücre basıncı için belirlenen pik gerilme değerleri kullanılarak çizilen Mohr diyagramından belirlenmiştir.



Şekil 4.14: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Sistemi [10, 12, 81, 82]

❖ Tan ve diğ., bitümlü karışımların içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve elastik sıkışma modülü gibi mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde üç eksenli basınç deneyinin kullanımını tanımlamaktadırlar [12]. Bu çalışmada deney sıcaklığı, şekil değiştirme hızı ve hücre basıncının asfalt betonunun sıkışma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, agregalar arasındaki içsel sürtünme ve kenetlenmenin bir fonksiyonu olan içsel sürtünme açısının deney sıcaklığı ve şekil değiştirme hızından bağımsız olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan kohezyonda, bağlayıcı ve karışımdaki ince malzemeye bağlı olarak hem deney sıcaklıklarından hem de şekil değiştirme hızının farklılaşmasından etkilenmektedir. Hücre basıncının c ve ϕ üzerinde herhangi bir etkiye sahip değilken, sıkışma modülü (E) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Deneyler kontrollü çevresel koşullar altında bu malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ve dayanım gibi temel mühendislik özelliklerinin belirlenebilmesi için sabit şekil değiştirme hızı ve hücre basınçlarında

gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, üç eksenli basınç altındaki bitümlü karışımların davranışının tanımlanmasında asimetrik sonlu elemanlar modeli uygulaması olan Druger-Prager akma koşullarına dayalı bir “sürekli plastisite modeli” kullanmışlardır. Analizler, plastisite modelinin numunelerinin kırılma anındaki gerilme-deformasyon davranışını tanımlayabileceğini, kırılma gerilmesi ve şekil değiştirmenin tam olarak tahmin edilebileceğini göstermiştir. Elastik-tam plastik süreklilik modelinin basit bir idealizasyonu için gerekli tüm parametrelerin sabit bir şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyinden belirlenebileceği vurgulanmaktadır.

❖ Fwa ve diğ. yukarıda anlatılan yöntemlerle hazırlanan ve test edilen numunelerden elde edilen kohezyon, içsel sürtünme açısı ve elastik modül gibi üç eksenli deney parametreleri ile Marshall deneyi sonuçları arasında istatistiksel bir bağlantı olduğunu belirlemişlerdir [82]. Marshall stabilite deneyi sonuçlarından üç eksenli kayma deneyi parametrelerini tahmin edebilme potansiyeline sahip istatistiksel tahmin modelleri geliştirilmiştir.

❖ Bu çalışmanın devamı niteliğinde olan diğer bir makalede, $c-\phi$ sonlu elemanlar modeli vasıtasıyla, üç eksenli deney parametreleri ve Marshall deney özellikleri arasında analitik olarak bir bağlantı kurulabileceği gösterilmiştir [10]. Böylelikle, geçmişte Marshall tasarımına dayanan kaplamaların analizi için faydalı bir yöntem sunulmaktadır. Smith yönteminin çok tabakalı asfalt kaplama sistemlerini temsil edemediği vurgulanan çalışmada, $c-\phi'$ ye bağlı bir analitik model oluşturulmuştur.

❖ Pellinen ve diğ. tarafından yoğun tane dağılımlı bitümlü karışım ve SMA karışımı olmak üzere iki bitümlü karışım tipi üzerinde, üç eksenli kayma deneyini kullanarak bir araştırma gerçekleştirilmiştir [84]. Bu çalışma, %0-13 arasında değişen farklı boşluk oranlarının karışımların mukavemetine etkilerinin incelenmesini konu almaktadır. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyleri 55 °C’ de ve 50 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 0, 138, 276 ve 414 kPa olmak üzere dört farklı hücre basıncı uygulanmıştır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısının belirlenmesinde Mohr-Coulomb kırılma kuramı kullanılmıştır. Deney sonuçlarının analizi %0 boşluk oranında karışımların hem en yüksek serbest basınç mukavemeti, kohezyon ve kayma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Bununda ötesinde çalışma bulguları, SMA karışımlarının yoğun tane dağılımlı karışımlara kıyasla boşluk yüzdesinin değişiminden daha az etkilendiğini ortaya koymuştur.

❖ Huang, kaba ve ince agrega geometrik özelliklerinin ve agrega tane dağılımının üç eksenli basınç altında bitüm-agrega karışımların dayanım davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır [85]. Bu çalışmada, hem kırılmış hem de doğal malzemeden seçilen iki türlü kaba ve iki türlü ince agrega kullanılmıştır. Agregaların geometrik

özelliklerinin niceliksel olarak ifadesinde tane indeksi kavramı kullanılmıştır. Agregalarından tane boyutu dağılımı için Talbot ve Richart'ın matematiksel ifadeleri kullanılarak üç farklı tane dağılımı formu oluşturulmuştur. Karışımlar 85-100 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılarak %5 optimum bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Üç eksenli basınç deneyi 15, 30, 45 psi hücre basınçlarında, 0,05 inç/dk, 0,1 inç/dk, 0,50 inç/dk eksenel şekil değiştirme hızlarında ve 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirildi. Araştırma sonuçları, uygulanan eksenel şekil değiştirme hızında agregalar tane dağılımına bağlı olarak, bitüm-agrega karışımların deviatör gerilme üzerinde hem kaba hem de ince agregalar geometrik özelliklerinin etkili olduğunu göstermiştir. Genellikle, aynı tane dağılımına sahip karışımlarda agregaların tanelerindeki artışla, deviatör gerilme önemli ölçüde artmaktadır. Agregaların geometrik özelliklerinin etkisi eksenel deformasyon hızı ve hücre basıncına bağlı olarak değişmektedir. Uygulanan şekil değiştirme hızında deviatör gerilme ile agregalar tane dağılımı indeksi arasında da bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bütün durumlarda, agregalar tane dağılımı indeksinin azalmasıyla deviatör gerilme artmaktadır.

❖ Kaloush ve diğ. tarafından lastikle modifiye edilen bitümlü karışımların performans değerlendirmesi için gerçekleştirilen çalışmada, gelişmiş dinamik deneyler arasında üç eksenli deneyi de yer almaktadır [86]. Lastik modifiye bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan karışımlar için, bir serbest ve iki koşullandırılmış üç eksenli deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden her bir karışım için standart kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) elde edilmiştir. 100 mm (4 inç) çapında ve 150 mm (6 inç) yüksekliğinde silindirik numunelerin kullanıldığı deneyler, 40 °C (100 °F)'de ve 0, 138 ve 276 kPa (0, 20 ve 40 psi) hücre basınçlarında gerçekleştirilmiştir. Numuneler seçilen hücre basıncı ve 1,27 mm/dk (0,05 inç/dk) şekil değiştirme hızında eksenel olarak kırılmıştır. Geleneksel bitümlü sıcak karışımlar için, tipik kohezyon (c) değerlerinin 5 ile 35 psi; tipik içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin 35° ile 48° arasında değiştiği çalışmada, üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları farklı bağlayıcılar ile hazırlanan karışımların kalıcı deformasyon dirençleri açısından değerlendirilmiştir.

❖ Stiady tarafından, Superpave hacimsel tasarım prosedürü kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi direncine agregalar tane dağılımı, ince agregalar köşeliliği ve VMA'nın etkilerini araştırmıştır [87]. Karışım tasarımlarında, tek tip PG 64-22 bağlayıcı, iki farklı nominal agregalar boyutu (19 ve 9,5 mm), iki tip kaba agregalar kaynağı (kireçtaşı ve granit), ince agregalar köşelilik değeri 39, 44 ve 50 olan üç tip ince agregalar ve üç farklı agregalar tane dağılımı (Superpave'de tanımlanan yasak bölge içinde, altında ve üstünde) kullanılmıştır. Tekerlek izi performansının belirlenmesinde

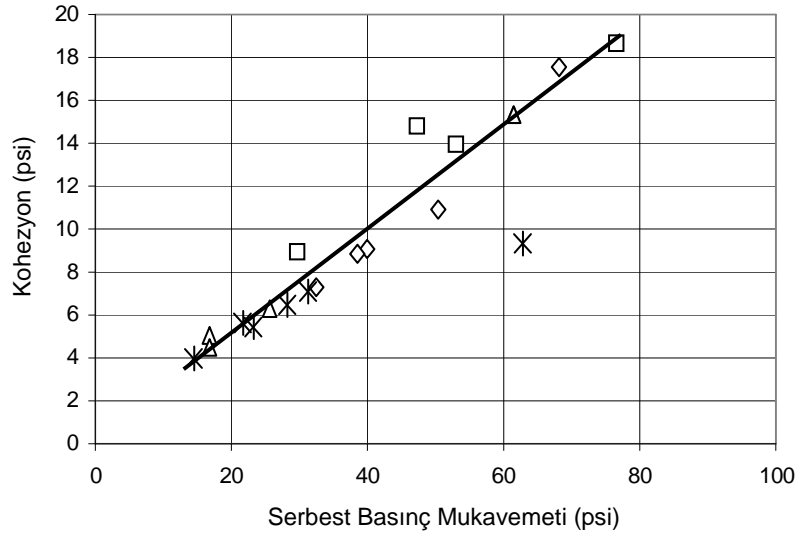
Purdue hızlandırılmış kaplama deney cihazı (APT) ve Purdue laboratuvar tekerlek izi deney cihazı (PURWeel), kritik VMA'ların belirlenmesinde üç eksenli kayma mukavemeti deneyi kullanılmıştır. Farklı agrega tane dağılımları için yoğurmalı pres ile hazırlanan numunelerin sıkıştırma enerjisi, aynı yoğunlukta numuneler elde edecek şekilde belirlenmiştir. Her bir karışım tipi için gerekli olan sıkıştırma enerjisi küçük bir çalışmayla belirlenmiştir. Sonuç olarak, birim hacim ağırlık değerleri birbirine en yakın numune çifti seçilerek üç eksenli numunesi oluşturmak için yapıştırılmıştır. Böylelikle 150 mm çapında ve yaklaşık 225 mm yüksekliğinde, yükseklik-çap oranı 1,5 olan numuneler elde edilmiştir.

Çalışmada ilk olarak, üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçlarına sıkışmanın etkilerinin belirlenmesi için 76, 96 (N_{tas}) ve 152 (N_{maks}) üç farklı sıkıştırma düzeyinde hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yürütülmüştür. 76 devir sayısı ile sıkıştırılan numunelerin %1 şekil değiştirme oranındaki kayma gerilmesi değerlerinin bitümlü bağlayıcı oranlarında ki değişimleri hassas bir şekilde yansıtamadığı görülmüştür. Her bir sıkıştırma düzeyinde, Superpave optimum bitüm yüzdesi, $opt.\pm 0,5$, $opt.\pm 1,0$ olmak üzere 5 farklı bitümlü bağlayıcı oranında çift numune hazırlanarak test edilmiştir. Bu çalışmada, Monismith ve Vallerga'nın 1956'da yaptıkları çalışma doğrultusunda, üç eksenli kayma deneyi yükleme hızı 1,27 mm/dk (0,05 inç/dk), hücre basıncı 138 ± 1 kPa (20 psi) ve deney sıcaklığı 60 °C (140 °F) olarak seçilmiştir.

Farklı karışımların değerlendirilmesi için, yük deformasyon grafiğinde %1 eksenel şekil değiştirmeye karşılık gelen kayma gerilmesi kullanılmıştır. %1 eksenel şekil değiştirmedeki kayma gerilmesi değerleri bazı karışımlarda pik gerilmeye çok yakın çıkmıştır. Genellikle lastik değme basıncı karışımların pik kayma gerilmesi değerinden daha az olduğundan, karışımların değerlendirilmesinde seçilmiştir. Örneğin, INDOT/Purdue APT yaklaşık olarak 620 kPa (90 psi) lastik şişme basıncına eşittir ve yaklaşık olarak %3 eksenel şekil değiştirme oranında, üç eksenli pik kayma mukavemeti 1800 kPa (261 psi)'dir.

❖ Pellinen'in yaptığı doktora çalışmasının bir bölümünde yer alan üç eksenli kayma mukavemeti deneyi servo-hidrolik deney aleti ve sıcaklık kabini kullanılarak gerçekleştirilmiştir [88]. Deney, 100 mm çapında ve 150 mm yüksekliğindeki numuneler kullanılmıştır. Çevresel hücre basıncında yapılan deneylerde numunenin sudan yalıtılması için membran kullanılmıştır. Deney, 54,4 °C (130 °F) sıcaklıkta ve 1,27 mm/dk (0,05 inç/dk) şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan yükler belirli aralıklarla kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak karışımların içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri hesaplanmıştır. Üç eksenli deneyinden elde edilen sonuçlar, McLeod tarafından 1950 yılında ortaya konulan $c-\phi$

stabilite abağına işlenmiş, karışımların bir kısmı yeterli bölgede kalırken bir kısmı bu lt sağlamamıştır. Şekil 4.15’da gösterildiği gibi test edilen karışımlar için serbest basınc mukavemeti ve kohezyon arasında mkemmek bir korelasyon olmasına rağmen, kohezyon yukarıda bahsedilen gerilme-dayanım analizindeki mukavemet yerine kullanılamaz. Çünkü kohezyon, McLeod stabilite ltnn belirttiği gibi tek başına bitümlü karışımların performansını açıklayamamaktadır. Dolayısıyla, karışımların mukavemetinin sadece serbest basınc deneyiyle değerlendirilemeyeceği, içsel sürtünme açısının da belirlendiği çevresel basınc altında gerçekleştirilen  eksenli deneyinin daha gerçekçi sonuçlar sağladığı belirtilmektedir.



Şekil 4.15: Kohezyon ile Serbest Basınc Mukavemetinin Korelasyonu [88]

4.3  Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Kuramsal Yaklaşımlar

Mantıksal veya mekanik analizlerde ilk adım, malzeme davranışını etkileyen çevresel koşullar için seçilen en uygun kırılma ltn sınır bozulma durumları ile birlikte değerlendirmektir. Sonrasında, asfalt kaplamaların temel davranışını en iyi Şekilde tanımlayan ve kırılma lt ile uyumlu malzeme parametrelerinden oluşan bir analitik model seçilmelidir. Bu modelden tahmin edilen performans ile arazi performansının karşılaştırılması yapılmalıdır. Bu değerler arasındaki uyumsuzluğun derecesi, model ve girdi parametreleri için gerekli olan değerliikler yapılarak en aza indirgenmeye çalışılır. Bir modelin doğruluğu temelini oluşturan kabullerin gerçeğe uygunluğuna bağlıdır.

Bir mekanik tasarım veya analiz yöntemi genellikle aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- ❖ Kaplama özelliklerini en iyi şekilde temsil eden ve laboratuvar deneylerinden elde edilen girdi parametrelerinin tanımlanması
- ❖ Kritik durumların (şekil değiştirmeler, gerilmeler v.b.) belirlenmesi için uygun yapısal bir modelin seçilmesi
- ❖ Yapısal modelden elde edilen ön tahminler ile kaplamanın arazi performans özellikleri arasında yeterli karşılaştırmaların yapılması

4.3.1 Kırılma Kuramı

Asfalt kaplamanın davranışı kullanılan malzemeye, malzemenin davranışı ise, uygulanan yüklemenin türü ve geçmişine bağlıdır. Buna göre, kullanılan malzeme ve yükleme koşulları yanında kaplama içindeki gerilme dağılımını etkileyen temel türü ve ara yüzey aderansı gibi faktörlerde dikkate alınarak uygun bir kırılma kuramı tanımlanmalıdır. Kabul edilen deviatör koşulları altında kaplama davranışı için belirlenen en uygun kırılma mekanizmasında kaplama yapısının performansını değerlendirmek için gerilme, şekil değiştirme ve enerji gibi bir parametreler kullanılabilir. Uygulamada kritik olarak kabul edilen parametreyi belirlemek için uygun deney standardı seçilmelidir.

Bununla birlikte sünek kırılma için uygulanan bir kuram, gevrek kırılma için uygulanmayabilir. Sıcak ve ılık iklim koşullarında sünek, soğuk iklim koşullarında gevrek bir davranış sergileyen bir malzeme için tek bir kuram uygulanamayabilir. Bir mekanik tasarımda, uygun kırılma durumun tanımlanması kadar kaplama sistemi içinde oluşabilecek olası gerilme durumları da göz önüne alınmalıdır. Sınırsız denilebilecek sayıda gerilme durumu için deney yapılması mümkün değildir. Kullanılan deneylerin uygulanmasındaki sınırlamalar, kaplama sisteminin maruz kalacağı çevresel ve yükleme koşullarının seçimini gerekli kılmaktadır. Bunun yanında, kritik kırılma ölçütünün seçimi, kaplama sisteminde oluşması beklenen gerilme durumları ve seçilen bozulma türleri için malzemenin ne şekilde kırılacağını tanımlayan kuram kadar gereklidir. Bu kritik nokta, kırılma ölçütüne ulaşılmadan önceki kritik parametre değerinin tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Asfalt kaplamalardaki kalıcı deformasyonun az sayıdaki yükleme tekrarı altında hızlı bir şekilde oluştuğu durumlar da görülmektedir. Bu durum, karışım stabilitesinin ve kayma gerilmesine karşı direncin yetersizliği sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

Yüksek çekme mukavemetine sahip bir bitümlü karışımının, içsel sürtünme direncinin yetersiz olması mümkündür. Diğer taraftan, iyi bir içsel sürtünme potansiyeline sahip kaplama tabakası içerisinde yanal basınç yetersiz düzeyde ise yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı direnci sağlayamaz. Bitümlü karışımların deformasyon direncinin bir göstergesi olan kayma mukavemetine en büyük katkıyı sağlayan parametreler kohezyon ve içsel sürtünme açısıdır.

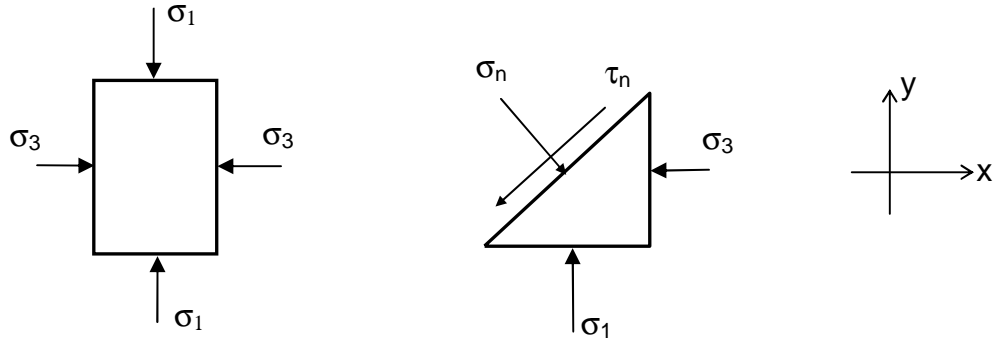
Değişik malzeme türlerinin kırılma davranışının tahmini için çeşitli kuramlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu kuramların hiçbiri bütün malzeme türleri ve yükleme kombinasyonları için elde edilen deney verileri ile uyumlu değildir. Bitümlü karışımda toplam gerilme durumu, karışımın performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, bir malzemede kırılmaya neden olan gerilmenin durumu doğru olarak tanımlanmış olmalıdır. Asfalt kaplamanın deformasyon davranışı, malzeme özellikleri ve gerilme durumuna olduğu kadar çevresel koşullara da bağlıdır.

Bir kaplama yapısının geleneksel analizi, en büyük gerilmenin tekerlek yükünün merkez hattındaki asfalt kaplama tabakası içerisinde oluştuğunu kabul etmektedir. Geleneksel deneyler, kaplama yapısında oluşan kırılma mekanizmasının tanımlanmasında tek bir düşey basınç gerilmesi kullanılmasını öngörmektedir. Bununla birlikte, kaplama yüzey profilinde istenmeyen kalıcı bir şekil değişimine sebep olan plastik deformasyon ve akmaya bağlı olan hızlı kırılma, asfalt kaplama içinde oluşan önemli büyüklükteki kayma hareketine bağlıdır. Farklı tabakalardan oluşan yol üst yapısında yer alan aşınma tabakaları; oktahedral kayma gerilmesi kuramı ve gerilme analizleri ile incelendiğinde, maksimum oktahedral kayma gerilmesinin her zaman merkez hattındaki asfalt kaplama tabakasında oluşmadığını göstermiştir. Bu sonuç, bir kaplama yapısının analizinde ve belirli bir bozulma türünün incelenmesinde geleneksel yöntemlerden kaçılmasının gerekliliğini göstermektedir.

4.3.2 Mohr-Coulomb Kırılma Kuramı

Otto Mohr tarafından, kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasında matematiksel bir bağıntı sunulmuştur [70]. Şekil 4.16'de verilen gerilme durumunun denge hali dikkate alınarak 4.5 ve 4.6 nolu denklemlerdeki ifadeler çıkartılabilir.

Bu ifadeler bir çemberin kutupsal denklemidir. Mohr dairesi olarak isimlendirilen bu özel daire, cismin herhangi bir düzlemindeki gerilme durumunu ifade etmektedir. Üç eksenli basınç deneyi terimleri olarak düşünüldüğünde, σ_1 uygulanan eksenel basınç gerilmesini, σ_3 ise çevresel hücre basıncını temsil etmektedir.

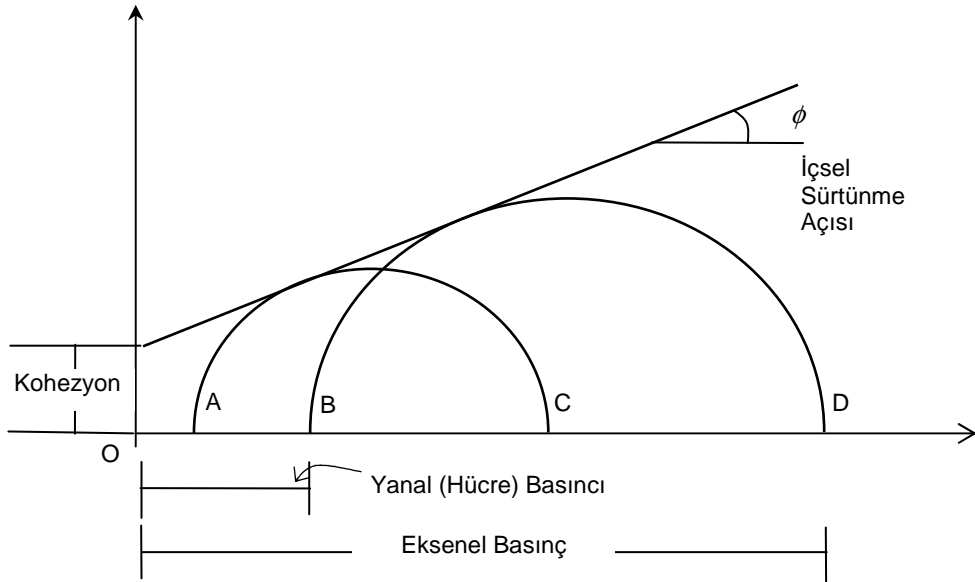


Şekil 4.16: Malzemenin Birim Kesitindeki Gerilme Denge Diyagramı [70]

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos 2\alpha \quad (4.5)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (4.6)$$

Şekil 4.17’de görülen Mohr diyagramında aksenal basınç gerilmesi ve çevresel hücre basıncı yatay eksenle belirtilir. Mohr dairesi cisim içerisinde çizilebilen gerilme durumlarını temsil eder. Dairenin çapı, σ_y (aksenal basınç) ve σ_x (yatay basınç) arasında farktır. Üç aksenli basınç deneyinin özel bir durumu olan serbest basınç deneyinde çevresel hücre basıncı sıfırdır.



Şekil 4.17: Farklı Yanal Basınçlar için Mohr Dairelerinin Çizimi [70]

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere, numuneye OB çevresel hücre basıncında OD büyüklüğünde bir basınç gerilmesi olduğu durum, Mohr dairesinin çapını BD temsil eder. İki farklı hücre basıncı için çizilen Mohr dairelerine teğet olan ve Mohr zarfı olarak tanımlanan doğru düşey eksen kestirilir. Mohr zarfının düşey ekseninde belirlediği bu büyüklük kohezyon olarak isimlendirilir. Uygulanan yük miktarından bağımsız olan kohezyon malzemenin başlangıç direncini temsil etmektedir. Mohr zarfının eğimi ise içsel sürtünme açısı olarak adlandırılır.

Malzemenin stabil veya kırılmamışlık durumuna karşılık gelen yükleme koşulları, Mohr zarfına değen her bir daire tarafından temsil edilmektedir. Mohr dairelerinin zarfa değdiği noktalar ise kırılma koşullarını ifade etmektedir. Burada dikkat çekilmesi gereken konu, Mohr zarfının belli bir sıcaklık ve yükleme hızı için malzeme karakteristiği olduğu ve uygulanan gerilmelere bağımlı olmadığıdır.

Kohezyon ve içsel sürtünme değerleri, bitümlü sıcak karışım tasarımı için önemlidir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi, bu iki özelliğin belirlenmesinde kullanılan temel deneyler arasında yer almaktadır.

Mohr-Coulomb kırılma ölçütü, zemin mekaniği uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu ölçüt, izotrop bir malzemede üç boyutlu gerilme durumu için bir Mohr dairesinin $(\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3)$ olduğunda $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ çap değerine sahip) kırılma zarfına değdiği noktada kırılma ya da akmanın başladığını ifade etmektedir. Bu ölçüt, bir noktada verilen gerilme durumunun etkisini tahmin etmek için kullanılabilir. Kırılma zarfı altında kalan bölge, kırılmaya karşı güvenli bir bölge olarak nitelendirilir. Bu ölçüte göre, kırılma düzlemindeki normal gerilmenin artışı ile kayma mukavemeti artmaktadır. Deneysel veriler, tüm kırılma dairelerine teğet ve güvenli bölgeyi sınırlayan kırılma zarfının, genellikle hafifçe konkav bir eğri olduğunu göstermektedir. Kırılma zarfı, en az iki Mohr dairesine teğet bir doğru çizilerek elde edilmektedir. Bu şekilde belirlenen bir Mohr-Coulomb kırılma zarfı, 4.7 nolu eşitlikte verilen Mohr-Coulomb denklemi ile ifade edilebilir [89].

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.7)$$

τ : Kayma mukavemeti

σ : Kırılma anındaki normal gerilme

ϕ : İçsel sürtünme açısı

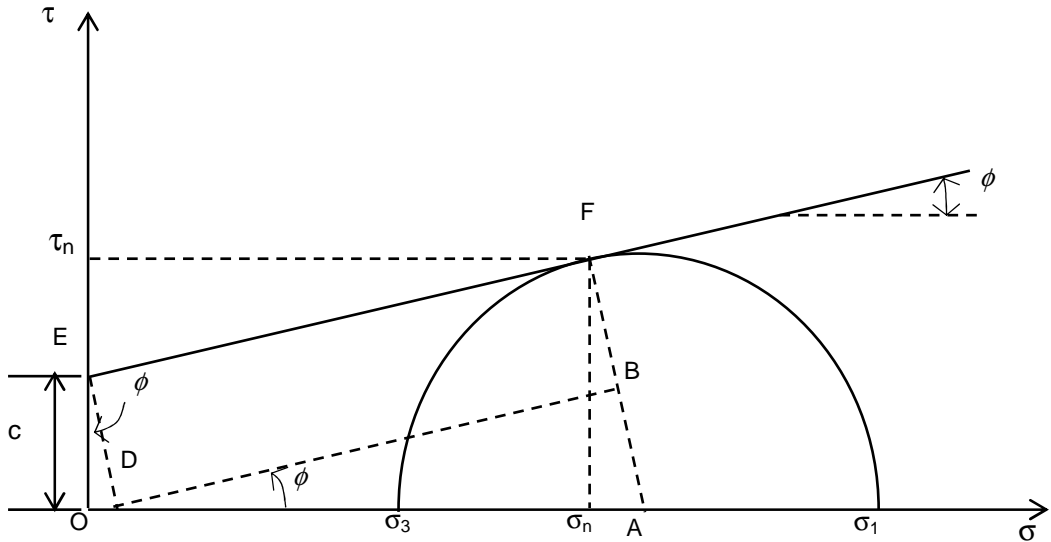
c : Kohezyon

Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) ifadelerini belirlemek için arazi koşullarını en iyi şekilde temsil eden en az iki farklı yanal basınçta (σ_3), üç eksenli kayma mukavemeti deneyi gerçekleştirilmelidir. c ve ϕ parametrelerin değerleri, Şekil 4.18’de görüldüğü gibi basit bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu yöntem, asfalt kaplamalar içerisinde oluşan gerilme koşullarına karşı duyarlı ve gerilme durumunu en büyük ve en küçük asal gerilmeler ile nispeten basitçe ve yeterli düzeyde tanımlayabilmektedir. Bu yöntemle, lastik basıncı ve tabakalar arası aderansın kritik koşulları değerlendirilebilmektedir (89).

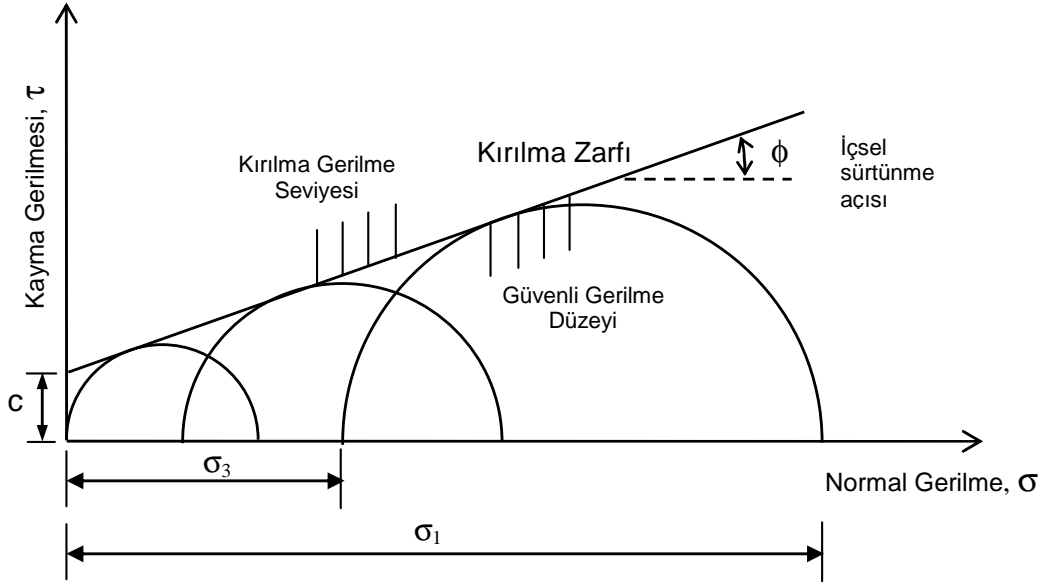
Grafiksel gösterimi Şekil 4.19’da verilen Mohr-Coulomb kırılma kuramı, asfalt kaplamaların stabilite ve hızlı deformasyona karşı dayanma potansiyelini değerlendiren basit ve direkt bir yöntemdir. Belirli bir karışım için tekerlek yükleri sebebiyle oluşan herhangi bir düşey asal gerilme altında kırılmaya neden olan koşulları kırılma zarfı geometrisinden hesaplanabilmektedir. Kırılmada en büyük ve en küçük asal gerilmeler (σ_1 ve σ_3) arasındaki bağıntı 4.8 nolu denklemde verilmiştir:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] + 2c \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

Bu denklemde herhangi bir malzemenin taşıyabileceği en büyük düşey gerilmenin (σ_1) yanal basınç (σ_3), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) ile bağıntılı olduğu görülmektedir.



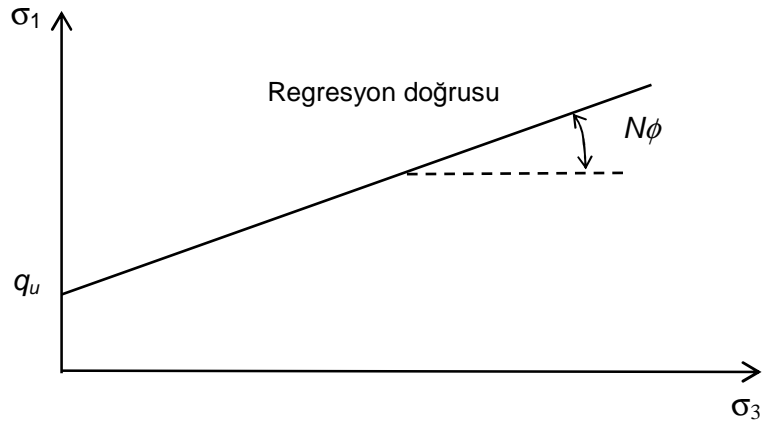
Şekil 4.18: c ve ϕ Parametrelerinin Belirlendiği Mohr-Coulomb Grafiği



Şekil 4.19: Mohr-Coulomb Kırılma Kuramı

Kapalı-sistem üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları Şekil 4.20'deki gibi asal eksen düzleminde işaretlenerek yapılan lineer regresyon ile çizilen kırılma zarfından kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplanabilmektedir. Bu gösterim, Mohr-Coulomb yaklaşımı ile benzerdir. Fakat kırılma düzlemindeki normal gerilmeler yerine asal gerilmeler kullanılmaktadır. Denklemi 4.9'da verilen regresyon doğrusunun eğimi ($N\phi$), çevresel (yanal) basınç katsayısı ve kırılma zarfının düşey eksenini kestiği nokta (q_u), malzemenin tek eksenli basınç dayanımını ifade etmektedir.

$$\sigma_1 - \sigma_3 N\phi - q_u = 0 \quad (4.9)$$



Şekil 4.20: Asal Gerilme Düzlemi

4.10 ve 4.11'deki eşitliklerin beraber çözülmesiyle, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) hesaplanabilmektedir.

$$N\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.10)$$

$$q_u = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.11)$$

İçsel sürtünmeye sahip olan taneli malzemelerin dayanımı, normal gerilme artışı ile artmaktadır. Gerilme-mukavemet oranı, malzemedeki gerilme düzeyinin kırılma zarfına ne kadar yakın olduğunun göstergesidir. Malzeme dayanımının bilinmesiyle, malzeme deneylerinin yürütülmesinde uygun gerilme düzeyi seçilebilmektedir. Uygulanan gerilmenin (τ) malzemenin dayanımına (τ_f) oranı (τ/τ_f), 4.12 ve 4.14 arasındaki denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eğer bu oranın "1" değerini aşması, malzemenin kırıldığını ifade etmektedir.

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin \left[\left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (4.12)$$

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \phi \quad (4.13)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_3 + c / \{ \tan(45 + \phi / 2) \}}{1 - \tan \phi / \{ \tan(45 + \phi / 2) \}} \quad (4.14)$$

Güvenlik faktörü (F_s), gerilme-mukavemet oranının ters ifadesidir ve kohezyonlu malzeme için (F_s), 4.15 ve 4.17 arasındaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır. Eğer, $F_s < 1$ ise malzeme kırılır.

$$F_s = \frac{\sigma_f}{\sigma} \quad (4.15)$$

$$\sigma_f = (q_u + N\phi_f \sigma_3) - \sigma_3 \quad (4.16)$$

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.17)$$

4.3.3 Drucker-Prager Kırılma Kuramı

Bitümlü karışımların elasto-plastik davranışını tanımlamada Drucker-Prager akma ölçütü de kullanılmaktadır. Drucker-Prager kırılma zarfı, ortalama asal gerilme değerinin alındığı Mohr-Coulomb yönteminin üç boyutlu olarak genelleştirilmiş halidir. Drucker-Prager tarafından önerilen akma fonksiyonu kırılma koşulu 4.18'deki eşitlikte verilmiştir.

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k' = 0 \quad (4.18)$$

$$\alpha = \tan \phi$$

$$I_1 : \text{Birinci gerilme invariantı} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 : \text{İkinci deviator gerilme invariantı} = 3/2(\tau_{\text{okt}})^2$$

$$k' : \text{Drucker-Prager kohezyon parametresi}$$

Akma düzlemi üzerindeki gerilme noktası, 4.18 nolu denklemi her zaman sağlayacak ve $(J_2)^{1/2}$ ifadesine karşılık I_1 olarak çizilen doğru üzerinde yer alacaktır. α ve k' sabitleri ise genel kırılma zarfının arakesitinden ve eğiminden belirlenir. Bu sabitler, Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb ölçütlerinin birleştirilmesiyle geleneksel üç eksenli deneyinden elde edilen içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) terimleriyle aşağıdaki 4.19 ve 4.20 eşitliklerindeki gibi ifade edilebilmektedir [81].

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.19)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.20)$$

4.3.4 Oktahedral Kayma Gerilmesi Kuramı

Oktahedral kayma gerilmesi kuramı, asfalt kaplama analizinde hem kalıcı deformasyon oluşumunu hem de elastik olmayan koşulları dikkate almaktadır. Bu kuram, malzemedeki toplam gerilme durumunu tanımlayan ve plastik deformasyon başlangıcı ile doğrudan ilişkili olan tek bir sayısal parametre sağlamaktadır [90].

Oktahedral kayma gerilmesi (τ_{okt}) değeri, kaplamada bir nokta boyunca herhangi bir düzlem üzerindeki en büyük kayma gerilmesi olmayabilir. Fakat bu değer genel bir gerilme durumunda akmanın başlangıcının tanımlanması açısından önemlidir.

Oktahedral kayma gerilmesi parametresi, belirli bir noktadaki gerilmelerin etkisini tanımlayan bir sayısal parametreyi ifade etmektedir. Bu teknik, çok daha doğrudan ölçülebilen bir yöntem sunmaktadır. Oktahedral kayma gerilmesinin genel ifadesi 4.21'deki eşitlikte verilmiştir.

$$\tau_{okt} = \frac{1}{3} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (4.21)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y ve z yönlerindeki normal gerilmeler

τ_x, τ_y, τ_z : xy, yz ve zx düzlemleri üzerindeki kayma gerilmeleri

τ_{okt} : Temel gerilme sabiti

Yukarıdaki ifade, kayma gerilmelerinin sıfır olduğu bir düzlem üzerinde asal gerilme terimlerinin yer aldığı 4.22 nolu denklemdeki gibi sadeleştirilebilir.

$$\tau_{okt} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (4.22)$$

σ_1 : En büyük asal gerilme

σ_2 : Orta büyüklükteki asal gerilme

σ_3 : En küçük asal gerilme

4.8 nolu eşitlikte verilen kırılma anındaki en büyük asal gerilme denklemi, kaplama yapısında herhangi bir durum için oktahedral kayma gerilmesini hesaplamak amacıyla 4.23'teki denkleme dönüştürülebilir.

$$\tau_{okt} = 0.942 \left[\frac{\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} + c \cdot \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)^{1/2} \right] \quad (4.23)$$

Eğer yüklenen alan etrafındaki kaplama tarafından sağlanan yanal destek (σ_3) belirlenebilirse, τ_{okt} 'in pratik değerleri 4.23 denkleminden elde edilebilir. Bu denklemdeki kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) ise üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden ölçülebilir.

Bu yanal desteğin (σ_3) büyüklüğü temas alanını çevreleyen yakın kaplamanın dayanımının bir fonksiyonudur. Bazı araştırmacılar, yanal destek (σ_3)'ün mantıklı bir değeri olarak bitümlü kaplama karışımının tek eksenli basınç dayanımının kullanılabileceğini belirtmektedir [91]. Tek eksenli basınç değeri 4.24'teki denklemde görülmektedir.

$$\sigma_3 = 2c \cdot \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)^{1/2} \quad (4.24)$$

σ_3 için verilen bu ifade 4.23'teki denklemde yerine konulduğunda, oktahedral kayma gerilmesi denklemi üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden belirlenen kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı değerlerine içeren 4.25'teki ifadeye dönüşecektir.

$$\tau_{okt} = 0.942c \cdot \left[\left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)^{1/2} \right] \quad (4.25)$$

Oktahedral kayma gerilmesi ve Mohr-Coulomb kuramları birbirinden tamamen farklı olmasına rağmen, bir çalışmada oktahedral kayma gerilmesi değerinin kırılma anında tam olarak numune üzerindeki deviator gerilmenin 0,471 katına eşit olduğunu gösterilmiştir [91]. Dolayısıyla, herhangi bir gerilme kombinasyonu altında maksimum oktahedral kayma gerilmesi $(\tau_{okt})_{max} = 0,471 \sigma_f$ değerine ulaştığında malzemede akma başlar. Bu ölçüt, enerjiden daha çok gerilmelerle ilgili olan kırılmanın şekil değiştirme enerjisi değişim ölçütünü uygulama imkânı verir.

Kaplamada oluşan gerçek oktahedral kayma gerilmesinin kuramdan tahmin edilen oktahedral kayma gerilmesine oranı, kaplamanın kırılmaya ne kadar yakın olduğunun bir göstergesi olarak kullanılabilir. Bu oran, "1" değerine yakın olduğu ölçüde tekerlek izi daha hızlı bir şekilde oluşacaktır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel çalışma programı, kullanılan malzemeler, deney numunelerinin hazırlanması, deney cihazları ve yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

5.1 Deneysel Çalışma Programı

Çalışma başlangıcında karışımlarda kullanılacak agrega ve bitümlü malzemelere ait özellikler kalite kontrol deneyleri ile saptanmıştır. Üç eksenli deney numunelerinin hazırlanması için ASTM D 1074’de tanımlanan çift taraflı sıkıştırma düzeneği Aşınma Tip-1 ve Taş Mastik Asphalt-TMA (Stone Mastic Asphalt-SMA) karışımlarına ait 150 mm yüksekliğindeki numunelerin sıkıştırma enerjisinin belirlenmesi amacıyla bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Statik sıkıştırma basınçları, Marshall tokmağı kullanılarak hazırlanan numunelerin birim hacim ağırlıklarına yakın olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler belirlenen bu sıkıştırma basınçları ile hazırlanmıştır. Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 asphalt kaplama tiplerinin tasarımı için kullanılacak numunelerin hazırlanmasında hem Marshall tokmağı hem de çift taraflı statik sıkıştırma düzeneği kullanılmıştır. Tekrarlı Sünme deneyinde kullanılan numuneler çift taraflı statik sıkıştırma düzeneği ile hazırlanan numuneler kesilerek elde edilmiştir. Çalışmada yapılan Marshall tasarımları için 132 adet, üç eksenli kayma mukavemeti deneyi için 236 adet ve tekrarlı sünme deneyi için 135 adet numune hazırlanmıştır.

Üç eksenli kayma mukavemeti deneyinin karışım tasarımında kullanımının araştırılması amacıyla, TMA Tip-1 karışım tipi için Marshall tasarımının gerçekleştirildiği bitüm yüzdelerinde hazırlanan üç eksenli numuneleri, 60 °C sıcaklıkta ve 1,27 mm/dk yükleme hızında 69, 138, 207 ve 276 kPa hücre basıncında test edilmiştir.

En büyük nominal agrega boyutunun ve tane dağılımının kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisini araştırmak için, Karayolu Teknik Şartnamesinde tane dağılım limitleri belirtilen Aşınma Tip-1, TMA Tip-1, TMA Tip-2 karışım tipleri seçilmiştir. İzmit Rafinerisi ürünü B 50-70 bitümlü bağlayıcı kullanılarak, optimum bitüm yüzdesini içine alacak şekilde üç farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler

üzerinde, 40 °C, 50 °C ve 60 °C’de üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri uygulanmıştır.

Bitümlü bağlayıcının başlıca reolojik özelliklerin (yumuşama noktası ve penetrasyon indisi) karışımın kalıcı deformasyon direncine etkilerinin belirlenmesi amacıyla çalışmada İzmit ve Kırıkkale Rafinerisi ürünü olan iki tip B 50–70 bitümlü bağlayıcı ve İzmir Rafinerisi ürünü tek tip B 70–100 ile tek tip modifiye bitüm kullanılmıştır. Aşınma Tip–1 ve TMA Tip–1 karışımları için, optimum bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerinde 40 °C, 50 °C ve 60 °C’de üç eksenli kayma mukavemeti ve tekrarlı sünme deneyleri uygulanmıştır.

5.2 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, iki farklı agrega (kaba agrega olarak bazalt agrega, ince agrega ve filler olarak kireçtaşı), sıcaklığa duyarlılığı farklı üç adet bitümlü bağlayıcı ile bir adet modifiye bitüm ve katkı malzemesi olarak bitümlü selülozik fiber kullanılmıştır.

5.2.1 Agrega

Kaba agrega taneleri arasındaki kenetlenme sebebiyle, TMA karışımlarında kullanılan agreganın türü ve özellikleri kaplamaların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bazalt esaslı agregaların, kireçtaşına göre daha sert ve aşınmaya karşı dirençli oluşları sebebiyle son zamanlarda ülkemiz koşullarında aşınma tabakalarında kullanılması önerilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğünü (KGM) tarafından yapılan TMA deneme yollarında kaba agrega olarak bazalt kullanılmıştır [6,7]. Bu bilgiler göz önünde tutularak bu çalışmada, kaba agrega olarak Eskişehir-Kızılınler-Eşenkara bölgesindeki taş ocağından temin edilen bazalt agrega kullanılmıştır. İnce agrega olarak Eskişehir bölgesi kalker ocağından alınan, plastik özellikte olmayan kireçtaşı esaslı agrega seçilmiştir. İnce agreganın No.200 elek altında kalan bölümü filler malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaba agregaya ait özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir. Seçilen karışım tiplerine göre agregalara ait özgül ağırlık ve su emme değerleri ise Tablo 5.2’de görülmektedir.

Bitümlü karışımların kayma direnci ve kalıcı deformasyon direncininin maksimize edilmesinde en büyük etkinin, agreganın fiziksel özellikleri ve tane dağılımları olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, agrega tane dağılımının etkilerinin iyi bir şekilde anlaşılması gereklidir. Bitümlü sıcak karışımlar, genellikle en büyük agrega boyutu ve tane dağılımı ile tanımlanmaktadır. Agrega tane dağılımı, istenilen hacimsel karışım özelliklerinin ve agrega iskelet yapısının sağlanması açısından önemlidir.

Bu çalışmada, yoğun tane dağılımlı (Aşınma Tip-1) ve kesikli tane dağılımına sahip (TMA Tip-1 ile TMA Tip-2) karışımlar için Tablo 5.3’de verilen KGM Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilen tane dağılım sınırları içinde kalan agrega tane dağılımları seçilmiştir. Şekil 5.1’de agrega tane dağılımı eğrileri verilen karışım tiplerinin saptanmasında TMA karışımlarda en büyük nominal agrega boyutunun etkisinin belirlenebilmesi için Şekil 5.2’de görüldüğü gibi GI değerleri birbirine çok yakın olacak şekilde seçilmiştir [92].

Tablo 5.1: Kullanılan Kaba Agreganın (Bazalt) Özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Kullanılan Kaba Agregaya ait Değerler			Limit Değerleri *	
					Aşınma	TMA
Aşınma Kaybı (Los Angeles), maks. (%)	TS 3694 (ASTM C-131)	13,5			30	25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, maks. (%)	TS 3655 (ASTM C-88)	0,64			10	8
Kırılmışlık Oranı, min. (%)	ASTM D 5821	100			100	100
Yassılık İndeksi, maks. (%)	BS 812	Aşınma Tip-1	TMA Tip-1	TMA Tip-2	30	25
		22	24	17		
Cilalanma Değeri, min. (%)	TS EN 1097-8	53			50	50
Su Emme Değeri, maks. (%)	TS 3526 (ASTM C-127)	Aşınma Tip-1	TMA Tip-1	TMA Tip-2	2,0	2,0
		1,59	1,55	1,65		
Soyulma Dayanımı, min. (%)	Kısım 403 EK-A	60-65			50	60

* Limit değerler KGM Karayolu Teknik Şartnamesi (2006)’dan alınmıştır.

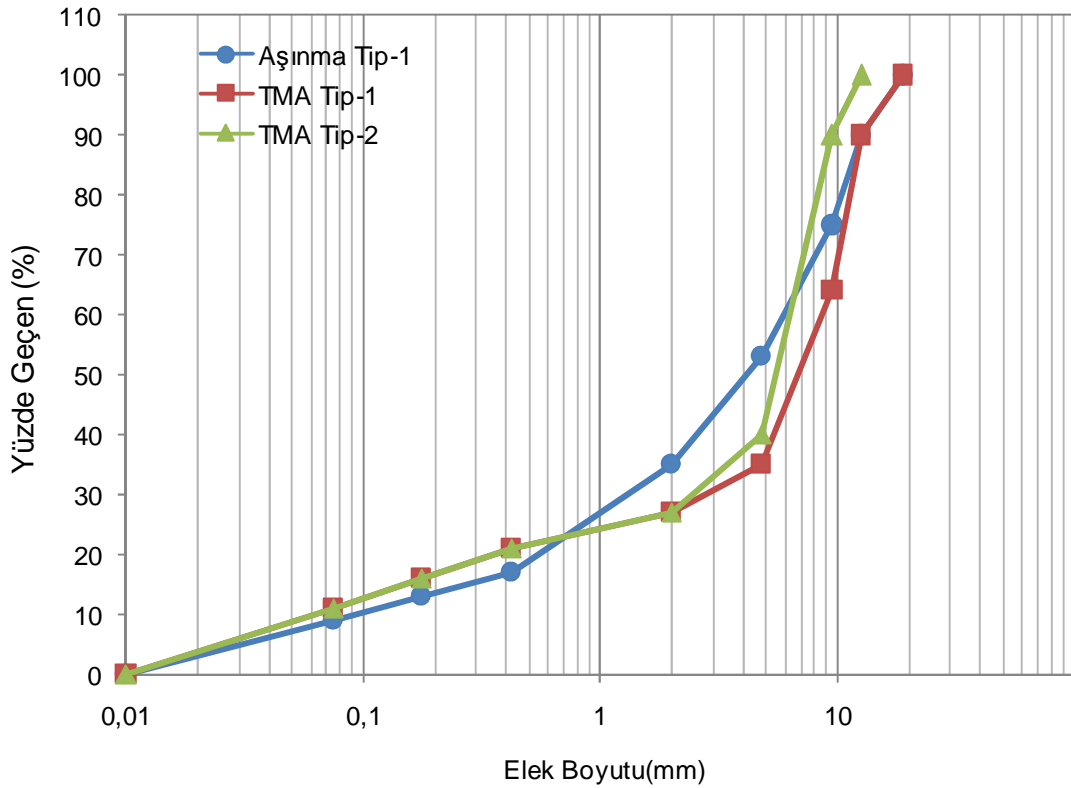
Tablo 5.2: Agregalara ait Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri (TS 3526)

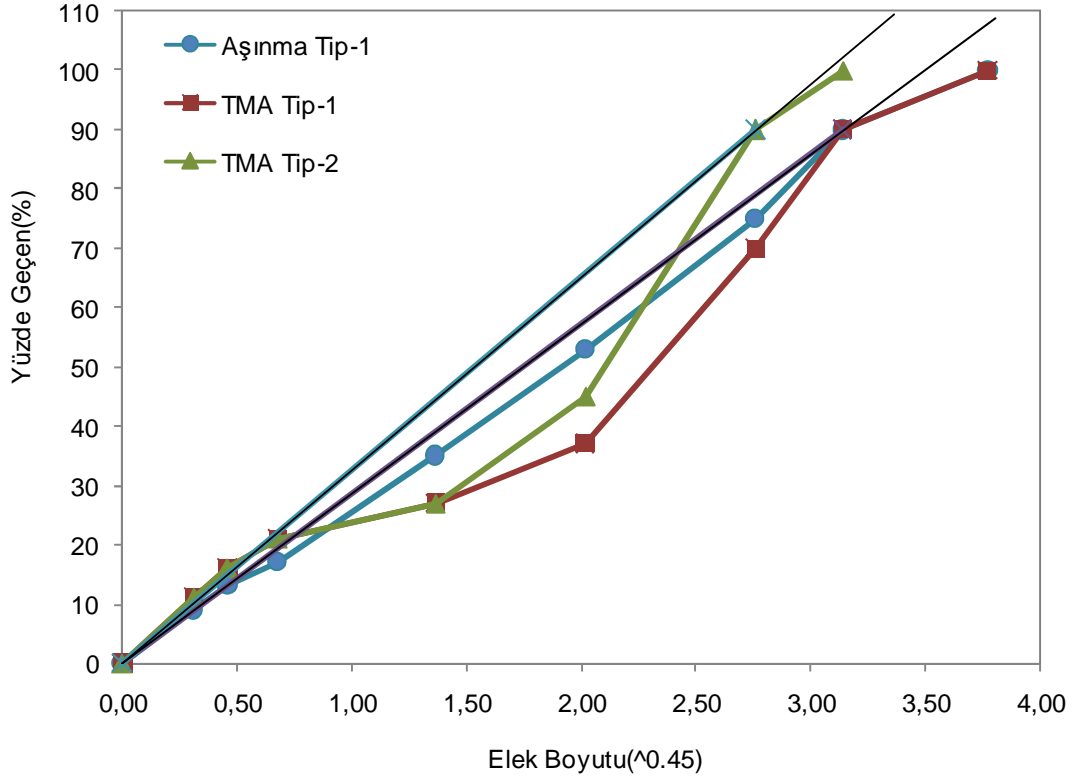
Agrega Sınıfı	Zahiri Özgül Ağırlık			Hacim Özgül Ağırlık			Su Emme Yüzdesi (%)		
	Aşınma Tip-1	TMA Tip-1	TMA Tip-2	Aşınma Tip-1	TMA Tip-1	TMA Tip-2	Aşınma Tip-1	TMA Tip-1	TMA Tip-2
Kaba Agregası	2,757	2,759	2,766	2,641	2,646	2,645	1,59	1,55	1,65
İnce Agregası	2,752	2,759		2,689	2,682		0,86	1,05	
Mineral Filler	2,774			-			-		

Tablo 5.3: Seçilen Agrega Tane Dağılımları ve Şartname Limitleri

No'su	Elek Boyutu mm	Aşınma Tip-1			TMA Tip-1			TMA Tip-2		
		Limit Değerleri *		Seçilen Tane Dağılımı	Limit Değerleri *		Seçilen Tane Dağılımı	Limit Değerleri *		Seçilen Tane Dağılımı
Alt Limit	Üst Limit	Alt Limit	Üst Limit		Alt Limit	Üst Limit				
3/4"	19,1	100	100	100	100	100	100	100	100	
1/2"	12,7	83	100	90	90	100	90	100	100	
3/8"	9,52	70	90	75	50	75	64	90	100	
No.4	4,75	40	55	53	25	40	35	25	45	
No.10	2,00	25	38	35	20	30	27	20	30	
No.40	0,42	10	20	17	12	22	21	12	22	
No.80	0,177	6	15	13	9	17	16	9	17	
No.200	0,075	4	10	9	8	14	11	8	14	

* Limit değerler KGM Karayolu Teknik Şartnamesi (2006)'dan alınmıştır.

**Şekil 5.1:** Karışımlarda Kullanılan Agrega Tane Dağılım Eğrileri (Bütün eğriler şartname sınırları içerisinde seçilmiştir)



Şekil 5.2: Seçilen Agrega Tane Dağılımlarının 0,45'inci Kuvvet Grafiği ve Tane Dağılım İndeks Değerleri

5.2.2 Bitümlü Bağlayıcı

Yüksek sıcaklıklarda oluşan kalıcı deformasyon oluşumunu önlemek için düşük penetrasyonlu bağlayıcıların seçilmesi gerektiği bilinmektedir. Fakat bitümler aynı penetrasyona sahip olsalar bile, geldiği kökene ve rafineride elde edilirken gördüğü işleme göre sıcaklığa karşı duyarlılığı farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, farklı orijinli bitümlerin başlıca reolojik özelliklerinin kalıcı deformasyondaki etkilerinin belirlenebilmesi için İzmit ve Kırıkkale Rafinerilerinin ürünleri olan B 50–70 ve İzmir Rafinerisi ürünü olan B 70–100 penetrasyonlu üç farklı bitümlü bağlayıcı ile bir adet Kırıkkale B 50-70 bitümlü bağlayıcının Kraton D katkısı ile modifiye edildiği polimer modifiye bitüm kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcılara ait özellikler Tablo 5.4'de verilmiştir. Kullanılan bitümlere ait penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri 3.42 nolu denklemde yerine konularak hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.4: Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılara ait Özellikler

Özellikler	Deney Standardı	Bitümlü Bağlayıcı Türleri			
		İzmit (B 50/70)	Kırıkkale (B 50/70)	İzmir (B 70/100)	Modifiye Bitüm
Penetrasyon, 25 °C, ($\times 0,1$ mm)	TS 118 EN 1426	69	70	75	37
Yumuşama Noktası, °C	TS 120 EN 1427	49	52	47	89
Sertleşmeye Karşı Direnç, 163 °C Kütle Kaybı, %	TS 121 EN 12607-2	-0,13	0,46	0,06	-0,05
Kalıcı Penetrasyon, %	TS 118 EN 1426	31	37	25	30
Sertleşmeden Sonra Yumuşama Noktası, °C	TS 120 EN 1427	54	61	52	94
Parlama Noktası, °C	TS 123 EN 22592	304	240	290	318
Özgül Ağırlık	TS 1087	1,030	1,032	1,044	1,026


Tablo 5.5: Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılara ait Penetrasyon İndeks Değerleri

Bitüm Özellikleri	Bitümlü Bağlayıcı Türleri							
	İzmit (B 50-70)		Kırıkkale (B 50-70)		İzmir (B 70-100)		Polimer Modifiye Bitüm	
	Yaşl. Öncesi	Yaşl. Sonrası	Yaşl. Öncesi	Yaşl. Sonrası	Yaşl. Öncesi	Yaşl. Sonrası	Yaşl. Öncesi	Yaşl. Sonrası
Penetrasyon	69	57	70	46	75	58	37	30
Yumuşama Noktası	49	54	52	61	47	52	89	94
Penetrasyon İndeksi(PI)	- 0,682	0,069	0,132	1,015	- 1,017	- 0,361	4,687	4,756

5.2.3 Bitümlü Selülozik Fiber

Deneysel çalışmada TMA karışımlardan bitümün süzülmesini önlemek amacıyla bitüm emdirilmiş selülozik fiber kullanılmıştır. KGM tarafından ülkemizdeki TMA uygulamalarında aynı katkı malzemesinin kullanımına rastlanmaktadır (6,7). Bitümlü selülozik fiberin görünümü ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlarda kullanılacak fiber miktarı, yapılan önceki çalışmalar dikkate alınarak katkısız bitümler için karışım ağırlığının %0,9; modifiye bitüm için ise %0,5 olarak belirlenmiştir. Bu fiber yüzdeleri için yapılan Schellenberger bitüm süzülme deney yöntemi ve deney sonuçları EK A'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Bitümlü Selülozik Fiberin Görünümü ve Fiziksel Özellikleri [9]

ÖZELLİKLER	DEĞERLER	GÖRÜNÜMÜ
Görünümü	Gri renkli, silindik topaklar halinde	
Fiber/bitüm oranı	%67,7 selülozik fiber, %33,3 bitüm	
Ortalama topak boyutu	4 ± 1 mm çapında	
Özgül ağırlığı	520 ± 50 g/l	
Selüloz içeriği	%80 ± 5	
Ortalama lif uzunluğu	110 µm	
Selüloz lif kalınlığı	45 µm	
Yoğunluğu	20-40 g/l	
Kül muhtevası (850 °C, 4 saat)	%15 ± 5	
pH değeri	7,5 ± 1	

5.3 Kullanılan Deney Düzenekleri ve Yöntemleri

Bu bölümde, bitümlü karışımlar üzerinde gerçekleştirilen Marshall, üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deney düzenekleri ve yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

5.3.1 Marshall Deneyi

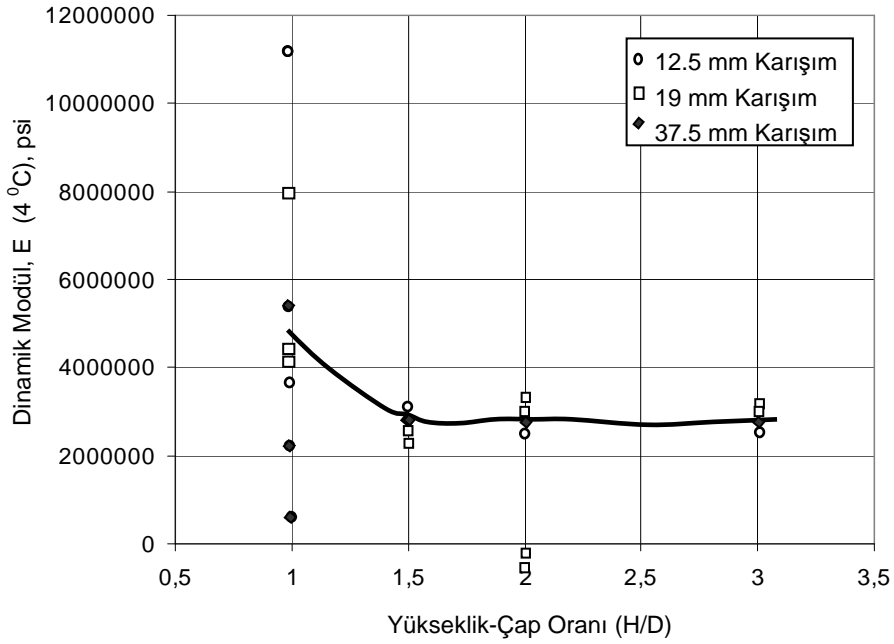
Marshall deneyi çok iyi bilindiğinden deney yöntemi hakkında özet bilgi verilmesi uygun görülmüştür. Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 kaplama karışımlarının bu yöntemle tasarımları yapılmış ve optimum bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Bu deney yöntemi, bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan ASTM D-1559 standardına göre uygulanmıştır [93]. Bu yöntem, Marshall sıkıştırıcısı kullanılarak farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine, Marshall test aleti ile yükleme yapılarak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsamaktadır. ASTM D 2726'ya göre birim hacim ağırlıkları belirlenen briketler 60 °C'lik su banyosunda 30 ile 40 dk beklemeden sonra, 50,8 mm/dk düşey şekil değiştirme hızına sahip Marshall deney aletinde 30 saniye içerisinde kırılmaktadır. Deney sonucunda, bitüm yüzdelerine karşılık gelen birim hacim ağırlık, boşluk, VMA, bitümle dolu boşluk, stabilite ve akma değerlerinin değişiminin çizildiği grafiklerden optimum bitüm yüzdesi belirlenmektedir.

5.3.2 Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi

Bu bölümde, çift taraflı statik sıkıştırma aleti ve numune hazırlama yöntemi, üç eksenli kayma mukavemeti deney düzeneği ve deney yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

5.3.2.1 Çift Taraflı Statik Sıkıştırma Aleti ve Numune Hazırlama Yöntemi

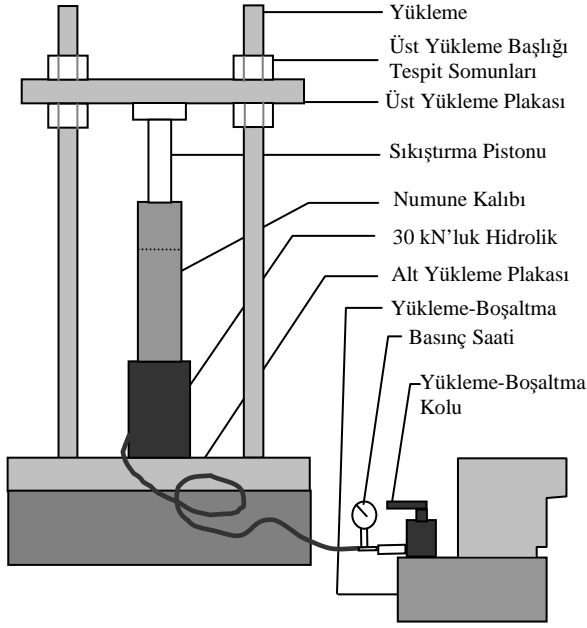
NCHRP 465 nolu raporda [68] kullanılan modifiye numune hazırlama protokolüne göre, numune boyutunun 100 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde olması önerilmektedir. Bu boyutların numune yüzeylerinin paralelliği ve iyi bir yalıtım sağlanarak malzeme özelliklerinin temsil edilmesinde yeterli olduğu belirtilmektedir [86]. Superpave yönteminde, kalıcı deformasyonların tahmininde kullanılan deney numunelerinin geometrisi üzerinde yapılan bir çalışmada, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi karışımdaki nominal en büyük agraga boyutu dikkate alınmaksızın en efektif yükseklik-çap oranı 1,5 olarak belirlenmiştir [87].



Şekil 5.3: Yükseklik-Çap Oranının Etkisi [87]

Bu çalışmada, üç eksenli kayma mukavemeti deneyi için 101,6 mm çapında ve 150 mm yüksekliğindeki numunelerin hazırlanmasında, ASTM D-1074 tanımlanan çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılmıştır [94]. Statik sıkıştırma basınçlarını belirlemek ve sıkıştırma yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla, iki farklı karışım tipinin tasarımı, ASTM D-1559 tanımlanan Marshall tokmağı kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

Bitümlü Karışımların Basınç Dayanımı için Standart Deneysel Yöntem (ASTM D 1074)'de tarif edilen çift taraflı statik sıkıştırma yöntemine uygun olarak bir numune sıkıştırma düzeneği tasarlanmış ve denemeler sonucunda üzerinde yapılan uygun değişikliklerle son halini almıştır. Şekil 5.4'te şeması ve fotoğrafı verilen sıkıştırma aleti, bir yüklem çerçevesi, 30 kN'luk bir hidrolik yüklem donanımı ve otomatik yüklem-boşaltma elemanından oluşmaktadır. Ayrıca, 150 mm yüksekliğindeki üç eksenli deneysel numunelerinin üretilmesi için Şekil 5.5'de görülen 101,6 mm çapında ve 250 mm yükseklikte 10 adet numune kalıbı imal edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4: Çift Taraflı Statik Sıkıştırma Aleti: (a) Şeması (b) Fotoğrafı

Bu boyutlardaki numunelerin hazırlanmasında kullanılacak kompaksiyon yöntemlerinin etkisi üzerinde yapılan kapsamlı bir çalışmada, Marshall sıkıştırıcısı ve yoğurmalı sıkıştırıcı ile tabakalı ve tek tabakada sıkıştırılan 200 mm yüksekliğindeki numunelerin üniform şekilde hazırlanmasının mümkün olmayacağı gösterilmiştir. Dolayısıyla, bu boyuttaki numunelerin üretilmesinde ASTM D-1074'de tarif edilen çift taraflı sıkıştırma yöntemiyle, tek tabaka halinde sıkıştırılan numuneler için numune profili boyunca yapılan nükleer yoğunluk ölçümlerinde en iyi üniform yoğunluk elde edilmiştir [83]. Bu yöntemde, gevşek karışımın kalıp içerisine yerleşmesi için 1 MPa'lık bir ön basınç uygulanmış ve sonra 25 MPa'lık yük 20 dk uygulanarak numune sıkıştırılmıştır. ASTM D-1074'te sıkıştırma yönteminde ön yüklem basıncı 1 MPa uygulanırken 20,7 MPa sıkıştırma basıncı 2 dk süreyle uygulanmaktadır.



Şekil 5.5: Çift Taraflı Statik Sıkıştırma Yönteminde Kullanılan Numune Kalıpları

Bu çalışmada kullanılan numune yükseklikleri ve karışım tipleri (Aşınma Tip-1 ve TMA) farklılık gösterdiğinden, statik sıkıştırma basınçlarını belirlemek için ön bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma basınçları belirlenirken Marshall tokmağıyla hazırlanan numune yoğunlukları dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada ASTM D-1074 belirtildiği üzere, sıkıştırma sıcaklığına ulaşan bitümlü karışımının yarısı, ısıtılmış ve yağlanmış kalıp içerisine yerleştirilerek spatulayla 15 defa dıştan olmak üzere 25 defa şişlenmiştir. Gevşek karışımın diğer yarısı içinde aynı işlem tekrarlanmıştır. Karışım alt ve üst pistonlar arasında ilk olarak 1 Mpa'lık bir basınçla sıkıştırılarak karışımın kalıp kenarlarına iyice yerleşmesi sağlanmıştır. Daha sonra Aşınma Tip-1 karışımlar için 35 MPa'lık ve TMA karışımlar için 25 MPa'lık basınç altında 20 dk süreyle sıkıştırılmıştır. Numune soğuduktan sonra numune çıkarıcı yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler deneye tabi tutulana kadar hava geçirmeyecek şekilde plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir.

Tek eksenli sünme deneylerinde kullanılan numuneler, statik sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerin, Şekil 5.6'daki kesme aletiyle seçilen boyutlarda kesilmesiyle elde edilmiştir. Böylelikle hazırlanan tüm numunelerin standart yüksekliklerde olması sağlanmıştır. Yüzey dikliği ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olan üç eksenli kayma mukavemeti ve sünme deneyi numunelerine başlık yapılmasına gerek kalmamıştır.

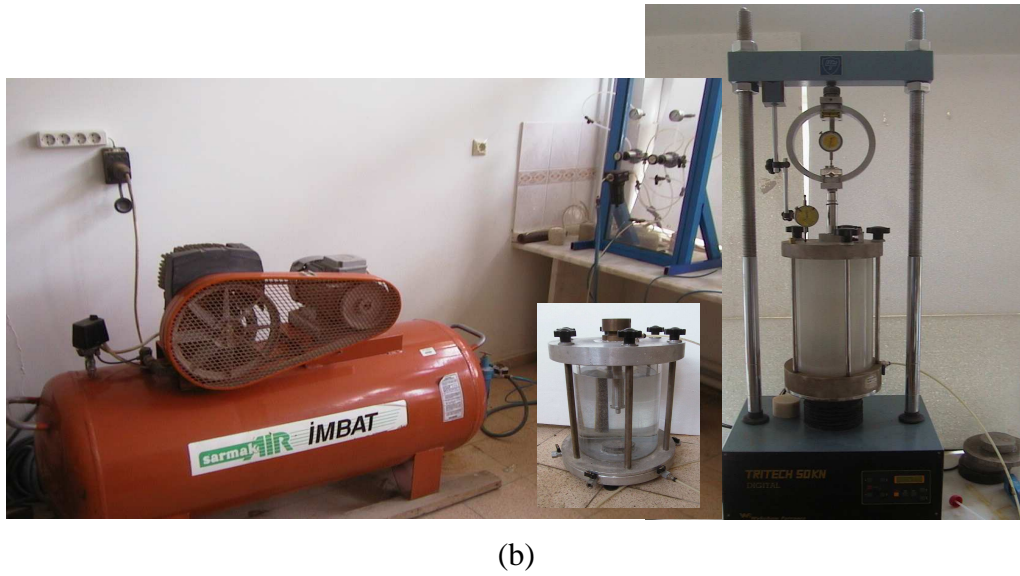
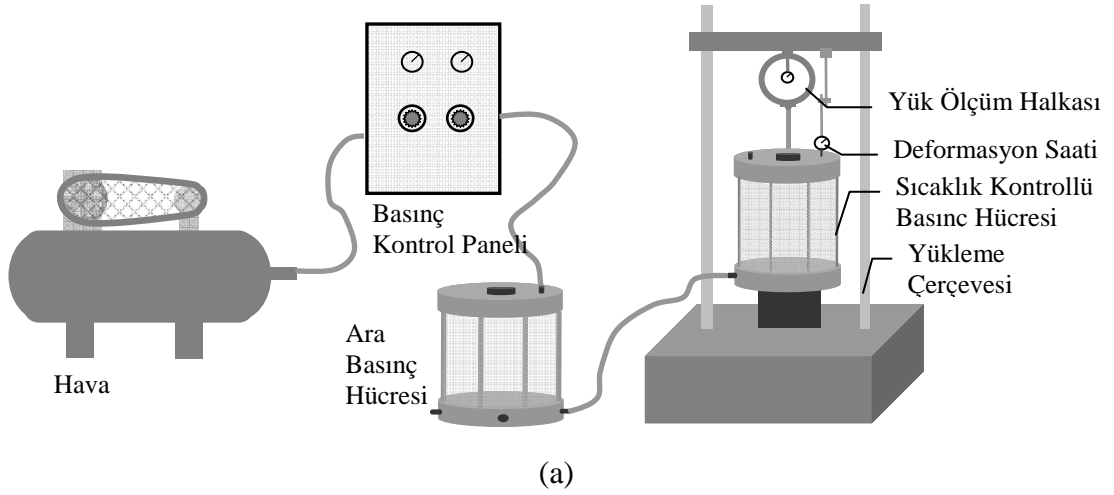


Şekil 5.6: Numune Kesme Aleti

5.3.2.2 Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Düzenegi

Bu çalışmada, zemin mekaniğinde kullanılan üç eksenli kayma mukavemeti deney düzenegi esas alınmıştır. Şekil 5.7’de şeması ve fotoğrafı görülen deney sistemi, hava kompresörü, basınç kontrol paneli, ara basınç hücresi, 50 kN kapasiteli şekil değiştirme hız kontrollü yükleme çerçevesi ve sıcaklık kontrollü basınç hücresinden oluşmaktadır. Deney sisteminde, hücre içerisindeki numuneye gerekli yanal basıncın verilmesi için hava kompresöründe üretilen basınçlı hava kontrol paneli vasıtasıyla istenilen büyüklükte ayarlanmaktadır. Ara basınç hücresi içerisindeki su, deneyin gerçekleştirileceği sıcaklık kontrollü basınç hücresine aktarılmakta, kontrol panelinden ayarlanan yanal basınç, ara basınç hücresi aracılığıyla üç eksenli hücresine uygulanmaktadır.

Çalışmada, zemin mekaniğinde kullanılan hücre türünden farklı olarak sıcaklık kontrollü yeni bir basınç hücresi tasarlanmıştır. Deneylerin istenilen sıcaklıklarda yapılabilmesi için hücre tabanına termostat kontrollü dairesel bir ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bu sistem ile hücre içerisindeki suyun sıcaklığı 0,5 °C duyarlılıkla kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, iki adet termal algılayıcı (thermocouple) vasıtasıyla hem hücre içerisindeki suyun, hem de numunenin sıcaklığı kontrol edilmektedir. Tasarlanan sıcaklık kontrollü hücre Şekil 5.8’de verilen fotoğraflarda görülmektedir. Sıcaklık kontrollü basınç hücresi yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra, deney istenilen şekil değiştirme hızında gerçekleştirilir. Belirli şekil değiştirme aralıklarında yük ölçüm halkasından alınan okumalar kaydedilir.



Şekil 5.7: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneş Sistemi: (a) Şeması (b) Fotoğrafi



Şekil 5.8: Sıcaklık Kontrollü Basınç Hücresi

5.3.2.3 Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Yöntemi

Bitümlü karışımlarda uygulanan üç eksenli kayma mukavemeti deney yönteminin bir standardı bulunmamaktadır. Bu konuda gerçekleştirilen önceki çalışmalar ışığında, araştırmada kullanılacak deney parametreleri belirlenmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi, yapılan önceki çalışmalardan yararlanarak 1,27 mm/dak yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Değişen her bir deney parametresi (karışım tipi, bitüm türü, bitüm yüzdesi, sıcaklık) için 69, 138, 207 ve 276 kPa hücre basınçlarında 4 adet numune test edilmiştir. Kalıcı deformasyon direnci deneylerinin gerçekleştirildiği sıcaklıklar ve bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri göz önüne alınarak deney sıcaklıkları 40, 50 ve 60 °C olarak seçilmiştir. Bu deneyde 101,6 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. Numune yüzeylerinin pürüzsüzlüğünü ve numune eksenine dikliğini sağlamak amacıyla kesme makinasında düzeltilmiştir. Numuneler deney anına kadar plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir. Deney numunesinin hücre içerisindeki su yalıtımını sağlamak için Şakıl 9a'daki lastik membranlar ve O-ringler kullanılmıştır. Şekil 5.9b'de görüldüğü gibi membran içerisine yerleştirilen numune O-ringler vasıtasıyla üç eksenli hücrenin alt ve üst başlıklarına tutturulur. İçerisine numune yerleştirilen üç eksenli hücresi yükleme çerçevesine konular ve basınç hücresindeki su, sıcaklık kontrollü deney hücresi içerisine doldurulur. Basınç kontrol panelinden deneyin yapılacağı hücre basıncı ayarlanır. Yaklaşık bir saat numunenin deney sıcaklığına ulaşması için beklenilir ve deney başlatılır. Deney sırasında belirli şekil değiştirme aralıklarında yük okumaları kaydedilir.



(a)

(b)

Şekil 5.9: Deney Numunesinin Üç Eksenli Basınç Hücresine

(a) Yerleştirilmesinde Kullanılan Malzemeler (b) Yerleştirilmiş Hali

Her bir hücre basıncı için deney sırasında kaydedilen yük-şekil değiştirme verileri kullanılarak birim şekil değiştirmelere karşılık gelen deviatör gerilme değerleri hesaplanmış ve dört farklı hücre basıncında test edilen numunelere ait deviatör gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çizilerek en büyük deviatör gerilmeler belirlenmiştir. 69, 138, 207 ve 280 kPa hücre basınçları (σ_3) için belirlenen en büyük asal gerilmeler (σ_1) kullanılarak Mohr daireleri çizilmiştir. Mohr dairelerine teğet olarak çizilen kırılma zarfının eğiminden içsel sürtünme açısı (ϕ), kayma gerilmesi eksenini kestiği noktadan ise kohezyon (c) değeri belirlenmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçlarının değerlendirilme aşamalarını gösteren yalnızca bir örnek EK B’de verilmiştir.

5.3.3 Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi

Bu deney, trafiğin oluşturduğu yükleme durumunu temsil ettiğinden kalıcı deformasyon direncinin belirlenmesinde ve tahmin modellerinin oluşturulmasında çok kullanılan deneylerden biridir. Deneyde, statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerden kesilerek elde edilen 64 mm yüksekliğindeki numuneler kullanılmıştır. Aşağıda, deney düzeneği ve yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

5.3.3.1 Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deney Düzeneği

Avustralya’da, Industrial Process Controls (IPC) firması tarafından geliştirilen Universal Testing Machine (UTM-5) deney sistemi, kapalı döngü pnömatik (servo-pneumatic closed loop) deney cihazı, veri toplama sistemi ve Linear Variable Differential Transducers (LVDT)’lerden oluşmaktadır (Şekil 5.10a). UTM-5’in yükleme sistemi 5 kN kapasiteli ve geniş bir frekans aralığında (0,1–25 Hz) yükleme yapabilmektedir. Tamamıyla bilgisayar kontrollü olan cihaz, sünme ve dolaylı çekme deney donanımlarından oluşmaktadır.

Bu çalışmada yalnızca Şekil 5.10b’de görülen statik ve tekrarlı sünme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği kullanılmıştır. Bu cihaz, deney süresince sıcaklığın korunması için geri beslemeli sıcaklık kontrol sistemi ile donatılmıştır. Sıcaklık kontrol, sistemi -18 °C ile +60 °C sıcaklık aralığında deney yapılmasını sağlamaktadır. Sıcaklık kabini ve numunenin gerçek sıcaklığı arasındaki farkların kontrolü ayrı bir numune içerisine yerleştirilen termal algılayıcı ile sağlanmaktadır.

Veri toplama sistemi, 16 bit’lik National Instrument kart ve Labview paket programı kullanılarak hazırlanan veri toplama programlarından oluşmaktadır. Labview, gerçek zaman şekil değiştirmelerini, basınç, sıcaklık ve yük bilgilerini sağlayabilmektedir. Labview programları, 8 kanal ile eşzamanlı ölçüm ve kayıt yapabilmektedir. Veri

toplama oranı deney süresi ve dalga tipine göre değişmektedir. Düşey ve yatay şekil değiştirmeler LVDT'ler ile ölçülür. Statik ve tekrarlı sünme deneylerinde düşey şekil değiştirmeleri ölçmek için, numune başlığına yerleştirilen 20 mm ölçüm aralığı olan iki adet LVDT ve dolaylı çekme ve yorulma deneyleri yanal şekil değiştirmelerin ölçülmesi içinde 2 mm'lik iki adet LVDT kullanılmaktadır.

5.3.3.2 Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deney Yöntemi

Tek eksenli tekrarlı sünme deneyinde farklı yükleme ve dinlenme periyodlarına sahip haversin dalga formundaki gerilmeler uygulanmaktadır. Bu çalışmada, deney süresince 138 kPa gerilme düzeyi sağlayacak tek eksenli basınç yükü, 0,1 s (100 ms) yükleme süresi ve 0,9 s (900 ms) dinlenme süresinden oluşan haversin dalga formunda uygulanmıştır. Deneyler, 40000 yükleme tekrarına veya LVDT'lerin ölçüm aralığı dışına çıkmasına sebep olan büyük şekil değiştirmelere kadar devam ettirilmiştir. Fakat bölüm 3.3.4' te anlatılan çalışmalar dikkate alınarak deneyler, 40, 50 ve 60 °C'ler gerçekleştirilmiştir. Sünme eğrisinin üçüncü bölgeye geçtiği noktadaki birim şekil değiştirme miktarı ve akma tekrar sayıları tespit edilmiştir [68, 69]. Deneylerde, her bir parametre için üç adet numune olmak üzere toplam 135 adet numune test edilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 5.10: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyinin Gerçekleştirildiği
(a) UTM-5 Deney Sistemi (b) Sünme Donanımı

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

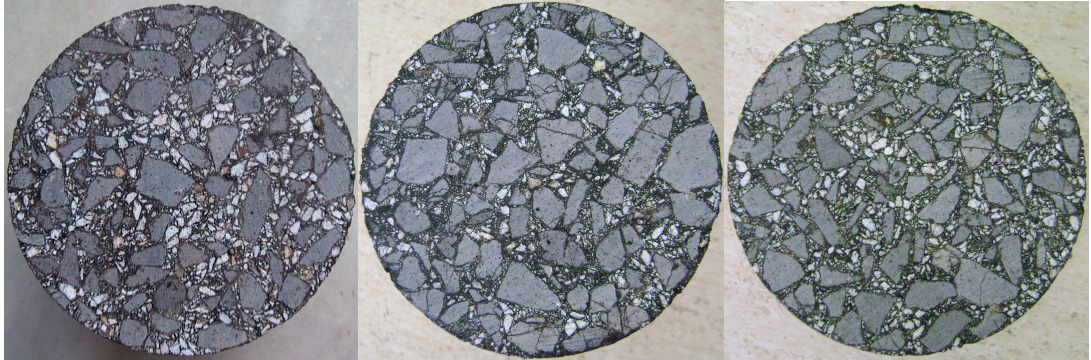
Bu bölümde, bitümlü sıcak karışımlar üzerinde gerçekleştirilen Marshall, üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyi sonuçları verilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, kalıcı deformasyon direnci açısından değerlendirilmiştir. Marshall yöntemi kullanılarak tasarımları yapılan karışımlar için belirlenen deneysel programın düzenli olarak yürütülebilmesi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde karşılaşılabilecek karışıklıkların önlenmesi için numunelerin tanımlanmasında Tablo 6.1’de verilen kodlama sistemi kullanılmıştır.

Tablo 6.1: Deneysel Numunelerinin Tanımlanmasında Kullanılan Kodlama Sistemi

Parametre Türü	Deneysel Parametreler			Kodlama	Örnekleme	
Karışım Tipi	Aşınma Tip-1			A		
	TMA-1 (SMA 12.5)			S		
	TMA-2 (SMA 9.5)			S'		
Bitüm Cinsi	İzmit B 50-70			1		
	Kırıkkale B 50-70			2		
	İzmir (Aliağa) B 70-100			3		
	Polimer Modifiye Bitüm (PMB)			4		
Bitüm Yüzdesi	Aşınma Tip-1	TMA-1	TMA-2	1		
	%5,0	%6,0	%6,5			
	%5,5	%6,5	%7,0			
	%6,0	7,5	%7,5			
Deney Sıcaklığı	40 °C			1		
	50 °C			2		
	60 °C			3		
Numune No'su	1. Numune			1		
	2. Numune			2		
	3. Numune			3		
	4. Numune			4		

6.1 Marshall Deneyi Sonuçları

Bu bölümde, kesitleri Şekil 6.1’de görülen Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımları için İzmit B 50-70 bitümü kullanılarak altı farklı bitüm yüzdesinde Marshall karışım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deneyde, her bir bitüm yüzdesi için 5 adet numune test edilmiştir. Aynı zamanda çift taraflı statik sıkıştırma yönteminde kullanılan sıkıştırma basınçlarının belirlenmesi için Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 için bir ön çalışma yapılmıştır. Marshall sıkıştırıcısıyla sırasıyla 75 ve 50 darbenin uygulandığı Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 karışımlar için hazırlanan numunelerin birim hacim ağırlık değerlerine yakın değerlerin elde edildiği statik sıkıştırma basınçları belirlenmiştir. Marshall boyutundaki numuneler, statik sıkıştırma ile hazırlanan numunelerden 5.4.2’de anlatılan yöntemle elde edilmiştir. TMA Tip-2 için yalnızca statik sıkıştırma ile hazırlanan numuneler üzerinde Marshall tasarımı yapılmıştır. ASTM D 1559 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Marshall tasarım deneylerinin sonuçları KGM Karayolu Teknik şartnamesinde belirtilen tasarım ölçütleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 için iki farklı sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan Marshall tasarım sonuçları sırasıyla Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’te verilmiştir. Yalnızca statik sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerin kullanıldığı TMA Tip-2 karışımının tasarım sonuçları Tablo 6.4’te verilmiştir. Ayrıca, tasarım sonuçları detaylı olarak EK C’ de sunulmuştur. Bu bölümde, toplam 132 adet numune denenmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 6.1: Karışım Tiplerine ait Numune Kesitleri: (a) Aşınma Tip-1
(b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2

Tablo 6.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, Aşınma Tip-1 için iki farklı sıkıştırma yönteminin kullanıldığı tasarım değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. TMA karışımlar için yapılan Marshall tasarımı yalnızca bir yaklaşım olarak kabul edilmekte, Karayolları Teknik Şartnamesinde tasarım ölçütü olarak VMA ve boşluk

değerleri ve tekerlek izinde oturma miktarının sınır değeri verilmektedir. Tablo 6.3'te iki farklı sıkıştırma yöntemi için verilen TMA Tip-1 Marshall tasarım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2: Aşınma Tip-1 için Marshall Tasarım Sonuçları

Özellikler	Marshall Sıkıştırıcısı ile Hazırlanan Numunelere ait Tasarım Sonuçları	Statik Sıkıştırma ile Hazırlanan Numunelere ait Tasarım Sonuçları	Asfalt Betonlu Aşınma Tabakası için Tasarım Ölçütleri*	
			Minimum	Maksimum
Optimum Bitüm, %	5,35	5,40	4,0	7,0
Birim Hacim Ağırlık, t/m ³	2,429	2,421	–	–
Stabilite, kgf	1125	1195	900	–
Akma, mm	3,65	3,62	2	4
Asfaltla Dolu Boşluk, %	72,5	72,9	65	75
Boşluk, %	3,94	3,98	3	5
VMA, %	14,03	14,13	14	–

* KGM Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006

Tablo 6.3: TMA Tip-1 için Marshall Tasarım Sonuçları

Özellikler	Marshall Sıkıştırıcısı ile Hazırlanan Numunelere ait Tasarım Sonuçları	Statik Sıkıştırma ile Hazırlanan Numunelere ait Tasarım Sonuçları	Taş Mastik Asfalt (TMA) Karışımlar için Tasarım Ölçütleri*	
			Minimum	Maksimum
Optimum Bitüm, %	6,61	6,8	–	–
Birim Hacim Ağırlık, t/m ³	2,359	2,368	–	–
Stabilite, kgf	709	876	–	–
Akma, mm	5,17	4,92	–	–
Asfaltla Dolu Boşluk, %	77,0	80,0	–	–
Boşluk, %	3,89	3,35	2 (3)	4 (4)
VMA, %	16,95	16,93	16	–

* KGM Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006

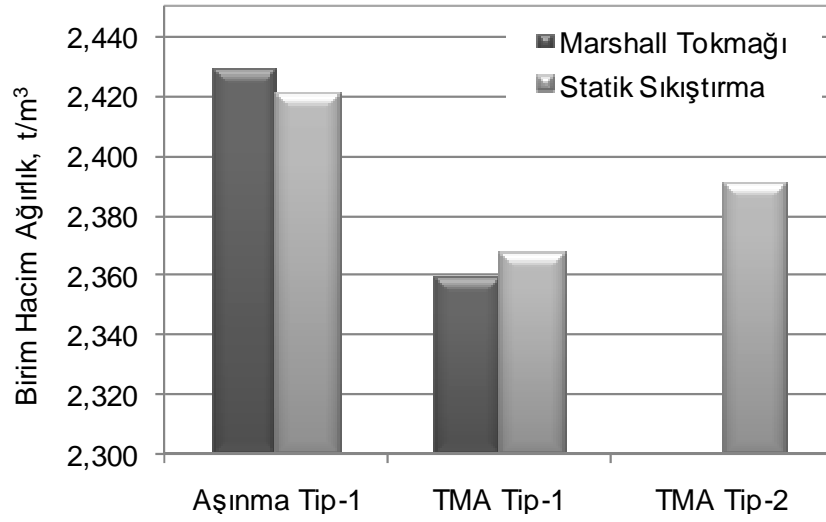
Tablo 6.4: TMA Tip-2 için Marshall Tasarım Sonuçları

Özellikler	Statik Sıkıştırma ile Hazırlanan Numunelere ait Tasarım Sonuçları	Taş Mastik Asfalt (TMA) Karışımlar için Tasarım Ölçütleri*	
		Minimum	Maksimum
Optimum Bitüm, %	6,9	–	–
Birim Hacim Ağırlık, t/m ³	2,391	–	–
Stabilite, kgf	837	–	–
Akma, mm	5,08	–	–
Asfaltla Dolu Boşluk, %	82,5	–	–
Boşluk, %	3,10	2 (3)	4 (4)
VMA, %	17,04	17	–

* KGM Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006

Aşınma Tip-1 için optimum bitüm yüzdesi %5,40 olarak belirlenmiştir. Her iki sıkıştırma yöntemi için bulunan tasarım değerleri Karayolu Teknik Şartnamesi'nde belirtilen sınırlar içerisinde. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 için yapılan tasarımda, optimum bitüm yüzdesi sırasıyla %6,6 ve %6,8 olarak belirlenmiştir. Tasarım değerlerinin şartnamede belirtilen boşluk ve VMA değerlerini sağladığı görülmüştür.

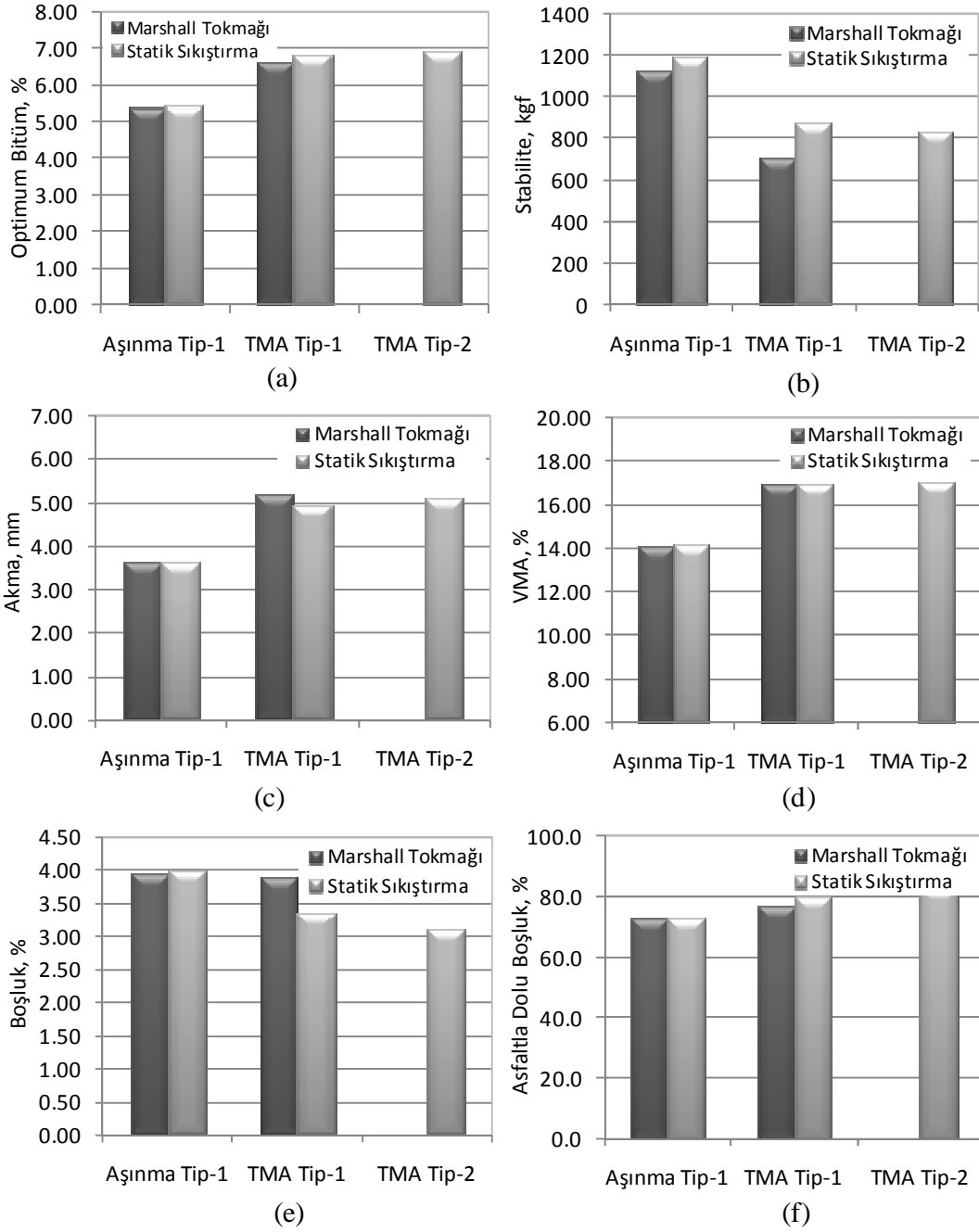
Şekil 6.2'de görüldüğü gibi iki farklı yöntemden elde edilen numunelerin tasarım birim hacim ağırlık değerleri arasındaki fark her iki karışım için 0,008 civarındadır. Dolayısıyla, Aşınma Tip-1 ve TMA karışımları için 150 mm yükseklikli numunelerin hazırlanmasında sırasıyla 35 MPa ve 25 MPa olarak belirlenen sıkıştırma basınçlarının uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2: Karışım Tiplerine ait Tasarım Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Tüm karışımlara ait diğer tasarım değerlerinin yer aldığı Şekil 6.3 incelendiğinde her iki sıkıştırma yöntemi için elde edilen optimum bitüm değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Statik sıkıştırmanın kullanıldığı tasarım stabilite değerleri Marshall sıkıştırıcısının kullanıldığı tasarım değerlerinden Aşınma Tip-1 için 70 kgf, TMA Tip-1 için ise 160 kgf daha yüksektir. Akma ve VMA değerleri ise birbirine oldukça yakındır. Aşınma Tip-1 için aynı olan boşluk yüzdeleri TMA Tip-1 karışımı için statik sıkıştırma yönteminde %0,54 daha azdır. Asfaltla dolu boşluk oranı TMA Tip-1 statik sıkıştırma yöntemi için %3 daha fazla bulunmuştur.

Karışım tipleri karşılaştırıldığında, sürekli tane dağılımına sahip olan Aşınma Tip-1'in stabilitesi, kesikli tane dağılımına sahip olan TMA karışımlardan oldukça yüksektir. TMA Tip-1'in stabilitesi azda olsa TMA Tip-2 karışımlardan yüksektir. Bu sonuçlar, Marshall stabilite deneyinin TMA karışımların performansının belirlenmesinde yetersiz kaldığını göstermektedir.



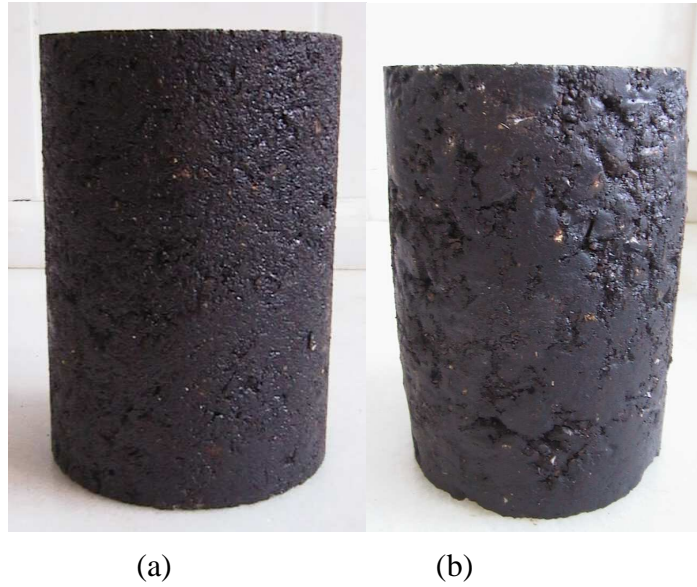
Şekil 6.3: Farklı Sıkıştırma Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Marshall Tasarım Sonuçları: (a) Optimum Bitüm (b) Stabilite (c) Akma (d) VMA (e) Boşluk (f) Asfaltla Dolu Boşluk

6.2 Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi Sonuçları

Çalışmanın esasını oluşturan bu bölümde, agrega tane dağılımı, bitüm kıvamı ve sıcaklığa karşı duyarlılık (yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi), bitüm yüzdesi ve sıcaklığın, karışımın deformasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi iki grup numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Birinci grupta deneyler, agrega tane dağılımı ve bitüm yüzdesinin etkisini belirlemek üzere, her bir karışım tipi için, en az üç farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. İkinci grupta ise, bitümlü bağlayıcının başlıca reolojik özelliklerinin etkisinin belirlenmesi için yumuşama noktaları ve penetrasyon indeksleri farklı bitüm türleri kullanılmıştır. Deneyler, Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 karışımları için tek bitüm yüzdesinde gerçekleştirilmiştir. Kalıcı deformasyon direncinde sıcaklığın etkisinin belirlenmesi için her iki gruptaki deneyler üç farklı sıcaklıkta (40 °C, 50 °C ve 60 °C) yapılmıştır. Değişen her bir parametre (karışım tipi, bitüm türü, bitüm yüzdesi ve sıcaklık) için genellikle bu tip çalışmalarda kullanılan 69, 138, 207 ve 276 kPa hücre basınçlarında dört adet numune olmak üzere toplam 236 adet üç eksenli numunesi test edilmiştir. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyinde test edilen numunelere ait birim hacim ağırlık ve boşluk analizleri EK D’de verilmiştir.

Deney yönteminde belirtilen 1,27 mm/dk yükleme hızında şekil değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen deney, kırılma sonrasındaki şekil değiştirme davranışını belirlemek üzere 10 mm’lik şekil değiştirme değerine kadar sürdürülmüştür. Numunelerin deney öncesindeki ve sonrasındaki fotoğrafları Şekil 6.4’te görülmektedir.



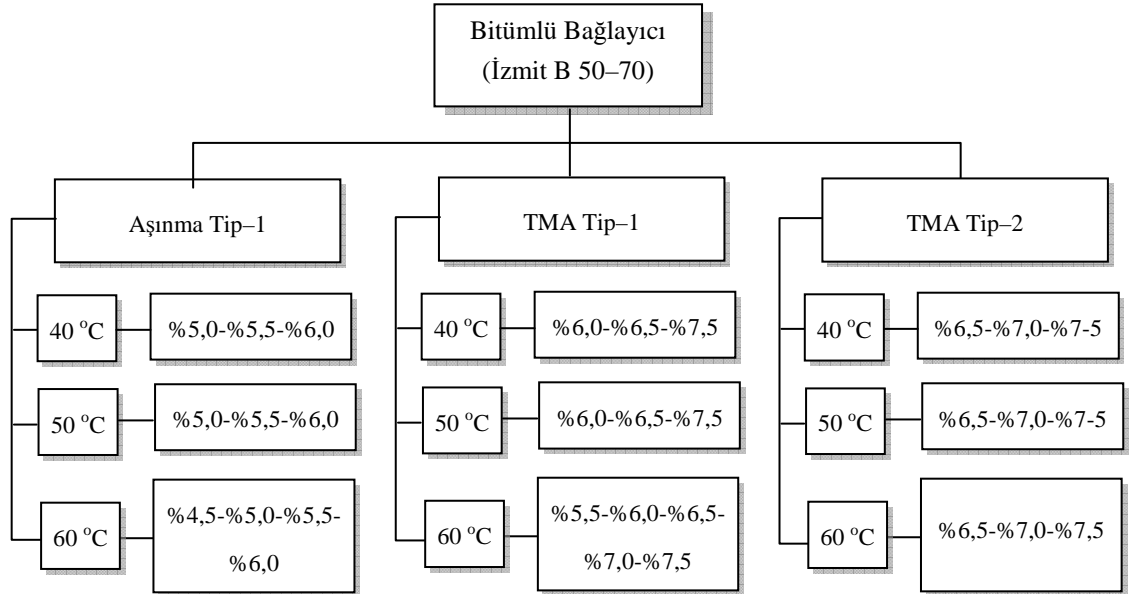
Şekil 6.4: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Numunelerinin Görünümü:
(a) Deney Öncesi ve (b) Deney Sonrası

Her bir karışım parametresi için dört farklı hücre basıncında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yük-şekil değiştirme verilerinden gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden maksimum deviator gerilmeler belirlenmiştir. Hesaplanan maksimum asal gerilmeler kullanılarak

oluşturulan Mohr dairelerine çizilen teğetlerden her bir parametre için kohezyon ve içsel sürtünme açıları saptanmıştır. Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçlarının değerlendirme aşamaları Ek-B'deki örnekte gösterilmektedir. Seçilen hücre basınçlarındaki sonuçlar, değişimleri genellikle aynı şekilde yansıttığından, yalnızca tek hücre basıncındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.

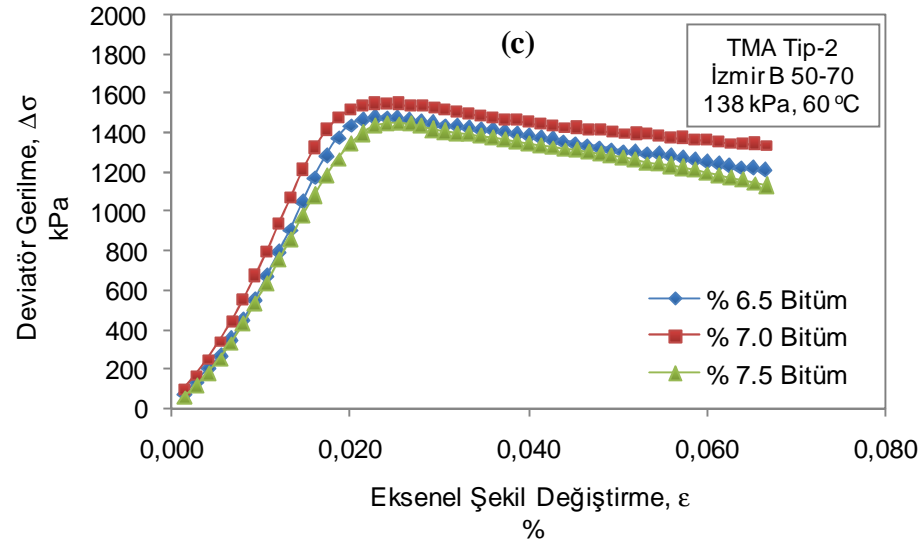
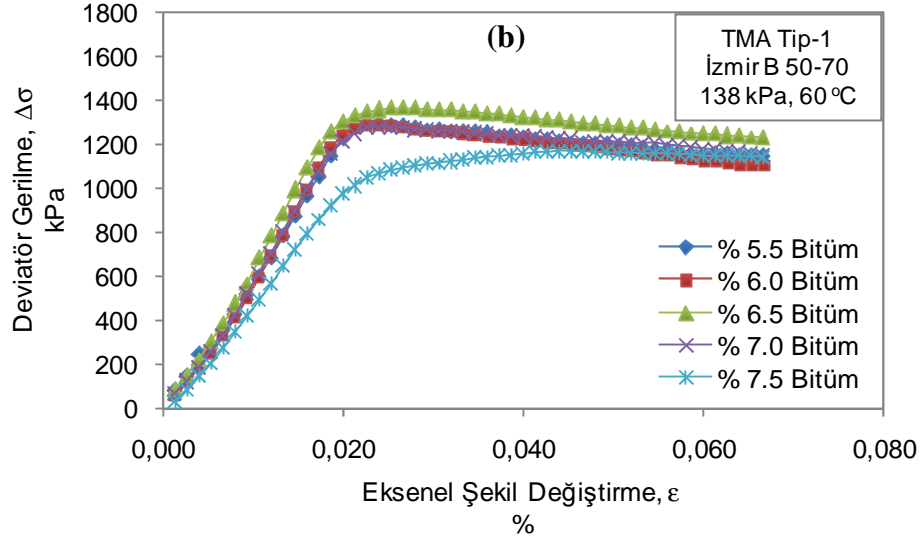
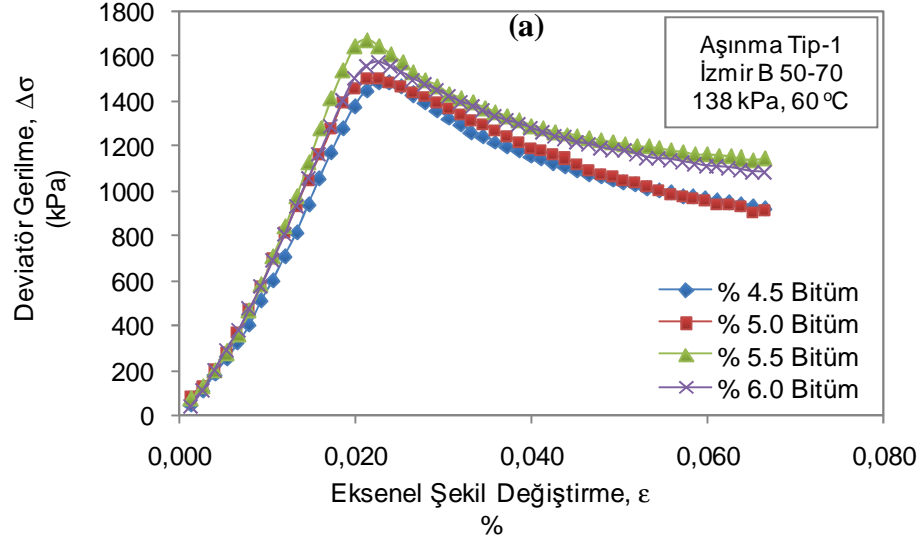
6.2.1 Agregata Tane Dağılımı ve Bitüm Yüzdesinin Karışımın Deformasyon Direncine Etkisi

Bu gruptaki deneyler Şekil 6.5'te verilen akış şemasındaki program çerçevesinde yürütülmüştür. Bu program, tek tip bitümlü bağlayıcı kullanılarak üç farklı karışım tipi için en az üç farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler üzerinde 40 °C, 50 °C ve 60 °C'de gerçekleştirilen üç eksenli kayma mukavemeti deneylerini kapsamaktadır.

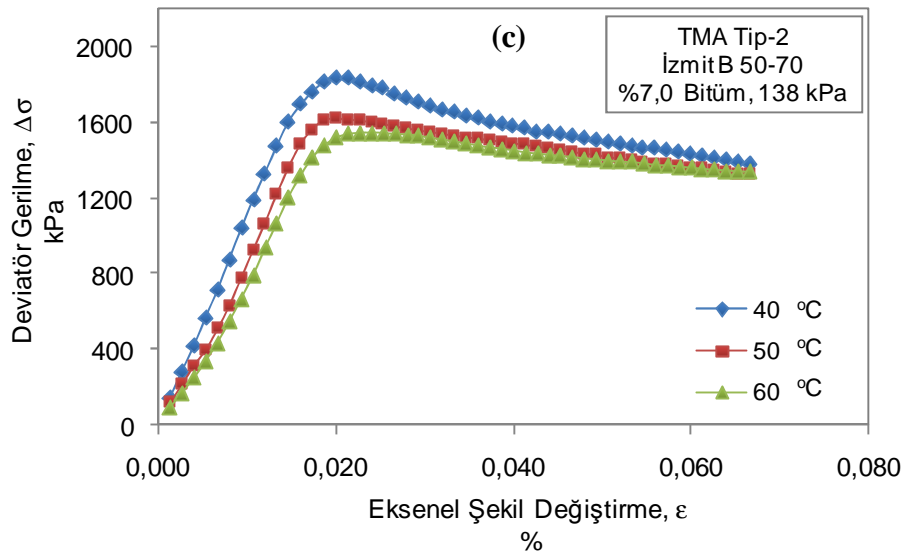
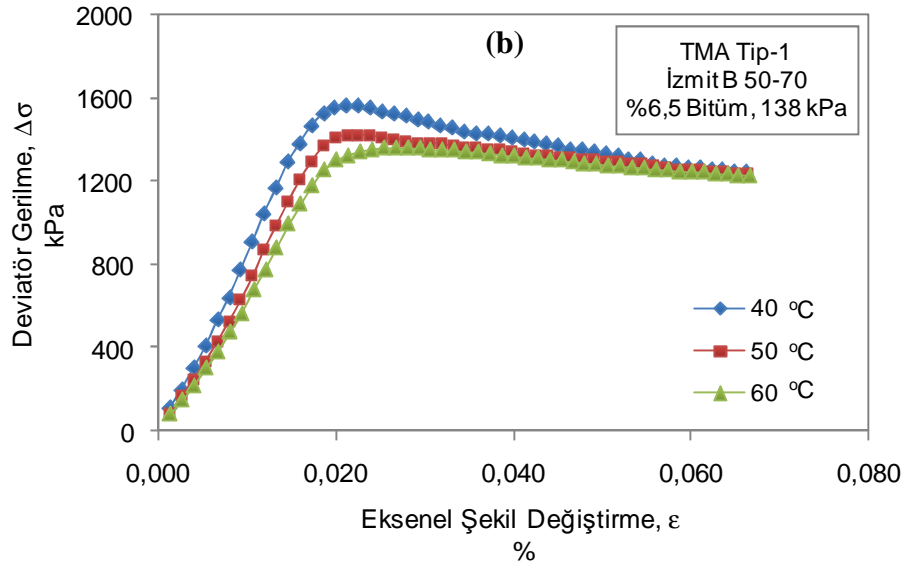
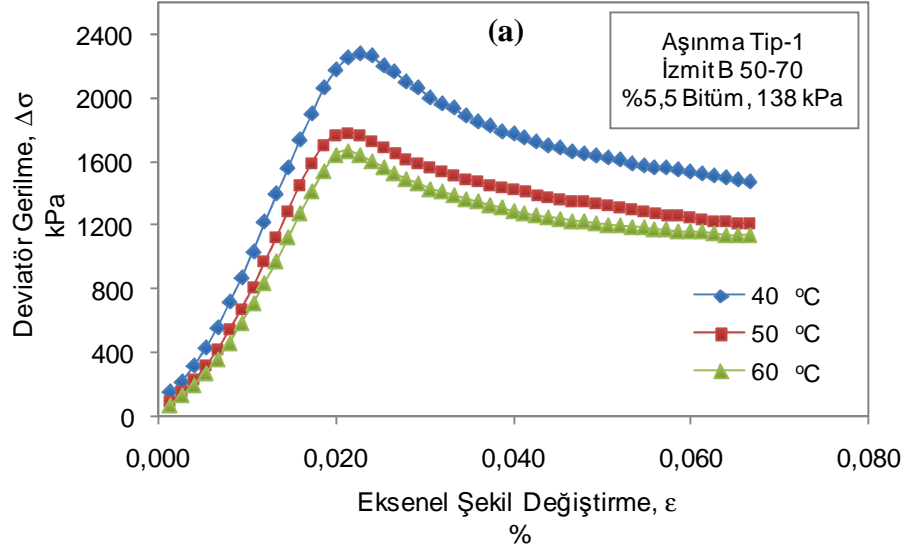


Şekil 6.5: Değişik Agregata Tane Dağılımı ve Bitüm Yüzdesi için Uygulanan Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Programı

Şekil 6.6'da verilen grafikler incelendiğinde, Aşınma Tip-1 karışımı için en yüksek deviyör gerilme değerinin %5,5 bitüm oranında elde edildiği görülmektedir. Bilindiği gibi deviyör gerilme değeri arttıkça karışımın deformasyon direnci de artmaktadır. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımları için en yüksek deformasyon direnci sırasıyla, %6,5 ve %7,0 bitüm oranlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, maksimum Marshall stabilite değerinin elde edildiği bitüm yüzdesini doğrulamaktadır. Sıcaklığın etkisini inceleyebilmek için her bir karışım tipinin maksimum deviyör gerilme değerinin elde edildiği bitüm yüzdesindeki karışımlara ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.6: Farklı Bitüm Yüzdelerindeki Üç Karışım Tipine ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) Aşınma Tip-1 (b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2



Şekil 6.7: Farklı Sıcaklıklardaki Üç Karışım Tipine ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) Aşınma Tip-1 (b) TMA Tip-1 (c) TMA Tip-2

Şekil 6.7'deki grafikler incelendiğinde, Aşınma Tip-1'e ait 50 ile 60 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirine yakınken, 50 ile 40 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasındaki fark oldukça büyüktür. TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlarda ise 50 ile 60 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri hemen hemen aynıyken, 50 ile 40 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasındaki fark, Aşınma Tip-1'dekinin üçte biri kadardır. Bu sonuçlar, yumuşama noktası değerini geçen sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine katkısının oldukça azaldığını, kaba agregalar arasındaki kenetlenmenin sağlandığı TMA karışımların deformasyon direncinin bitümlü bağlayıcının dayanım kaybından çok daha az etkilendiğini göstermektedir.

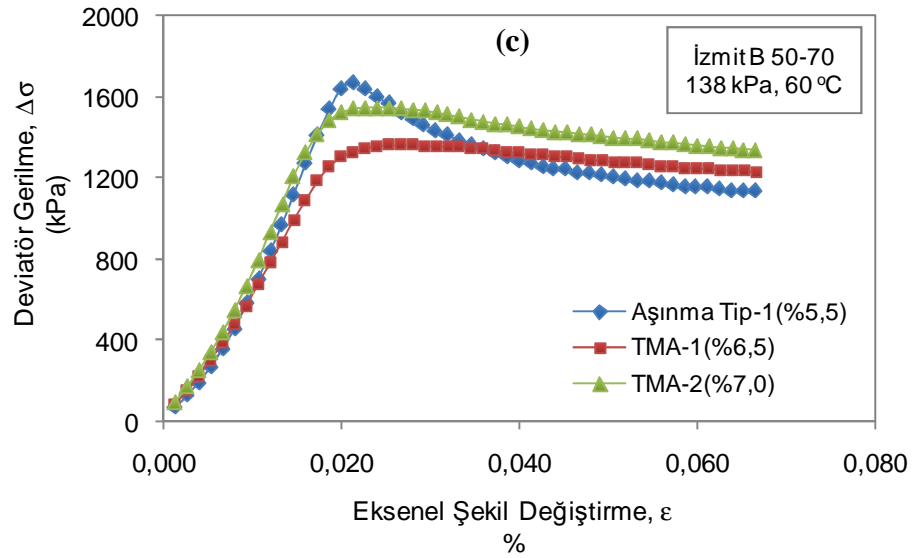
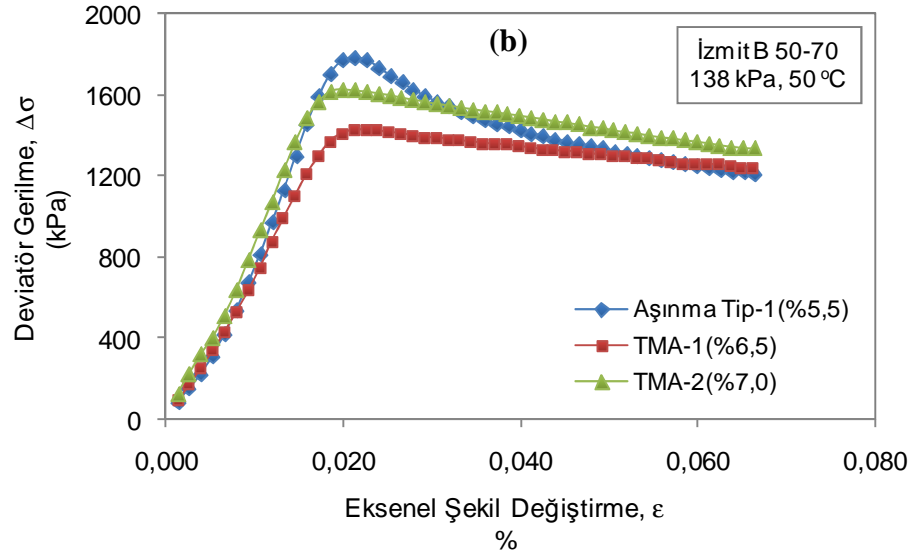
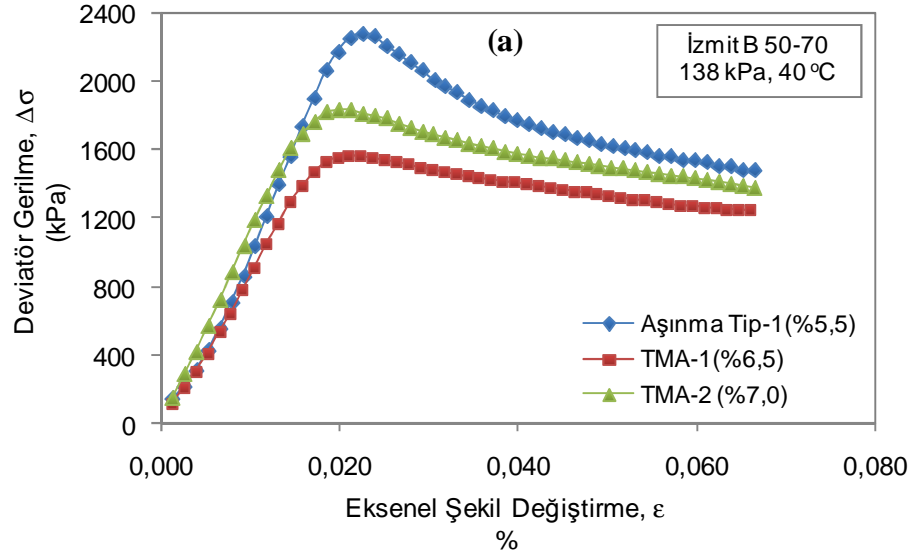
Üç karışım tipine ait 40, 50, 60 °C'lerindeki gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin verildiği Şekil 6.8'deki grafiklerde, Aşınma Tip-1 ile TMA karışımların 40 °C'de maksimum deviatör gerilmeleri arasındaki fark yaklaşık 700 kPa civarında iken, 50 ve 60 °C'lerde bu farkın yaklaşık 200 kPa düştüğü görülmektedir. Ayrıca, bu sıcaklıklarda yapılan deneylerdeki numuneler kırıldıktan sonra, Aşınma Tip-1'in deformasyon direncinde TMA karışımlara göre daha büyük oranda azalma gözlenmiştir.

Aynı zamanda, Aşınma Tip-1'e ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri TMA karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin altına düşmektedir. Her üç sıcaklık değerlerinde TMA Tip-1 ve Tip-2 karışımlar arasındaki fark korunurken her iki karışım tipi için de kırıldıktan sonraki gerilme değerlerinde ani ve aşırı bir azalma görülmemektedir. Bu sonuçlar, karışımların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinde iri agrega miktarının olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

TMA Tip-2'nin deviatör gerilme değerleri TMA Tip-1'den daha büyüktür. Tane dağılım İndeks (GI) değerleri ve kaba agrega yüzdesinin aynı olduğu TMA karışımlar arasındaki bu sonuç, küçük nominal agrega boyutunda agregalar arasındaki daha iyi bir kenetlenme olduğunu göstermiştir.

Marshall deneyinde Aşınma Tip-1'in stabilite değerleri TMA karışımlardan oldukça yüksek belirlenmiştir. Marshall deneyinin TMA karışımların davranışlarını yansıtmaması sebebiyle 2006'da yayınlanan Karayolu Teknik Şartnamesinde TMA karışımların tasarımında yer almamaktadır.

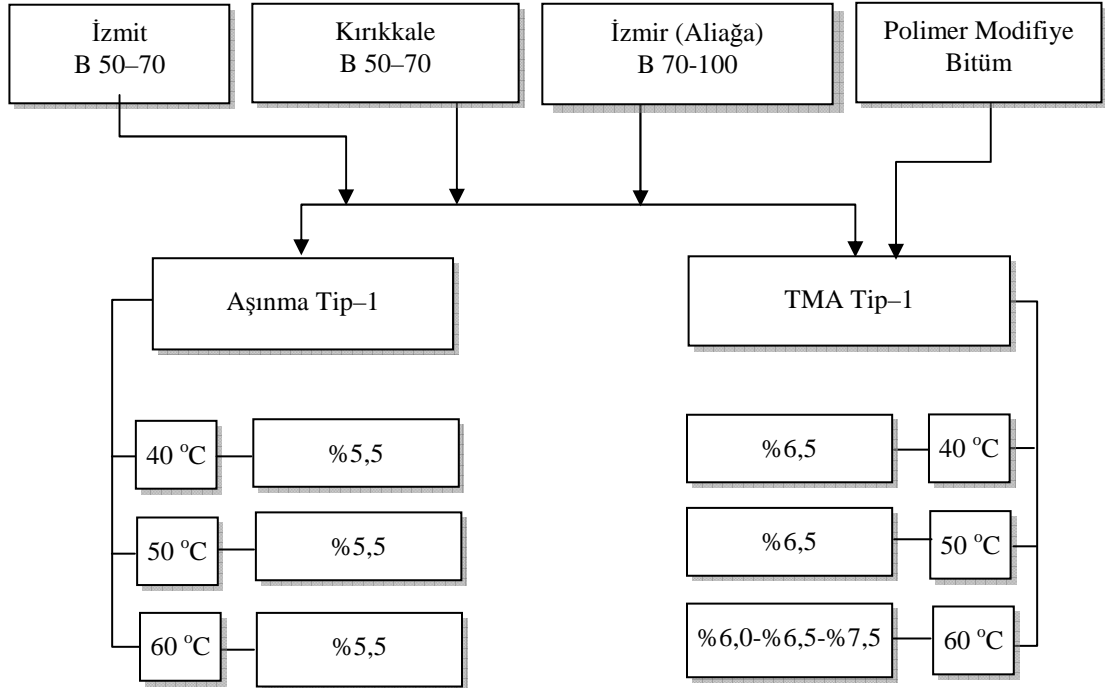
Üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları ise, bu deneyin TMA karışımların dayanımı gerçekçi olarak yansıttığını göstermiştir. ÜKM deneyi, agrega tane dağılımı ve bitümlü bağlayıcı yüzdesinin kalıcı deformasyon direncine bilinen etkisini iyi bir şekilde açıklamaktadır.



Şekil 6.8: Üç Karışım Tipinin Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

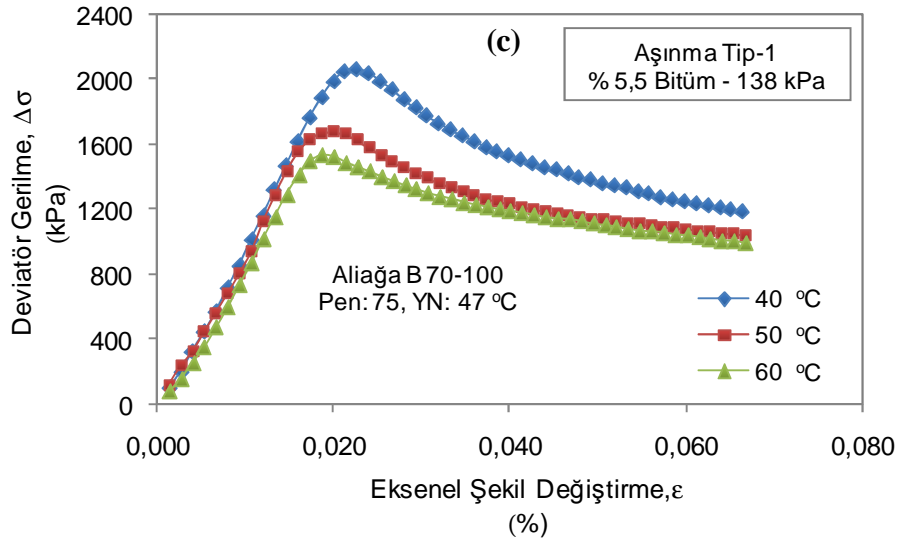
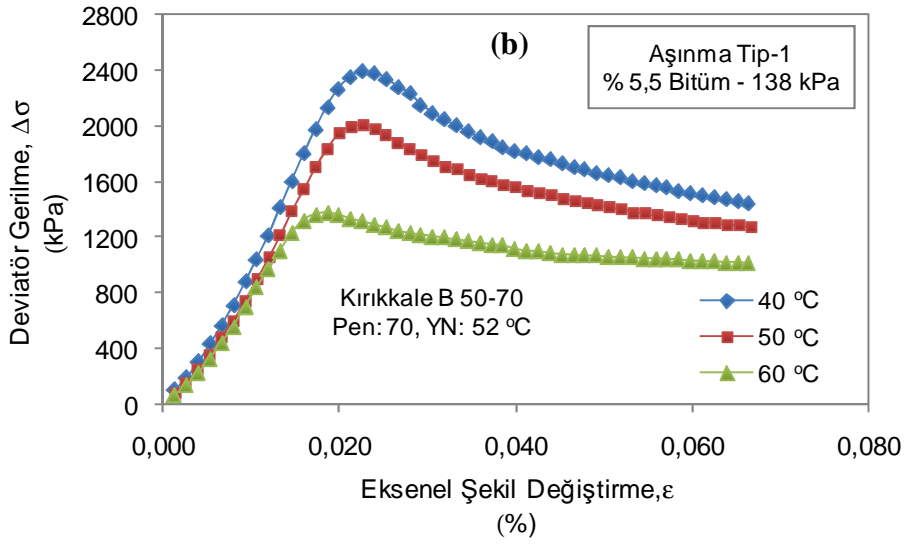
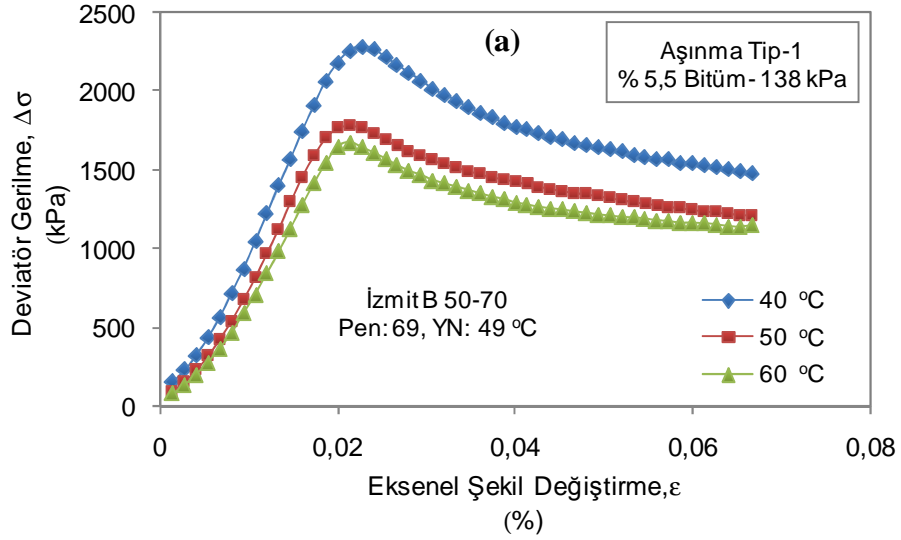
6.2.2 Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özelliklerinin Karışımın Deformasyon Direncine Etkisi

Reolojik özellikleri farklı olan bitümlü bağlayıcıların, karışımın kalıcı deformasyon direncine etkilerinin incelendiği ikinci grupta, Şekil 6.9'daki akış şemasında verilen deneysel program uygulanmıştır. Kıvamı ve sıcaklığa duyarlılığı birbirinden farklı olan üç bitümlü bağlayıcı ve bir modifiye bitüm kullanılarak Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 karışımları için maksimum deviyatör gerilmelerin elde edildiği bitüm yüzdesinde hazırlanan numuneler 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda test edilmiştir. Kırıkkale, İzmir (Aliağa) ve polimer modifiye bitüm için Marshall tasarımları yapılmamıştır. Bu grupta kullanılacak bağlayıcı yüzdesinin belirlenmesi için üç farklı bitüm yüzdesinde hazırlanan TMA Tip-1 numunelerine 60 °C'de üç eksenli kayma mukavemeti deneyi uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda, seçilen bitümler için maksimum deviyatör gerilmenin elde edildiği bitüm yüzdesinin aynı değer (%6,5) olduğu belirlenmiştir. TMA Tip-1'de kullanılan bitüm türleri için optimum bitüm yüzdesi değişmediğinden, Aşınma Tip-1'de kullanılan bitümlü bağlayıcılar için, İzmit B 50-70 için belirlenen optimum bitüm yüzdesi (%5,5) kullanılmıştır.

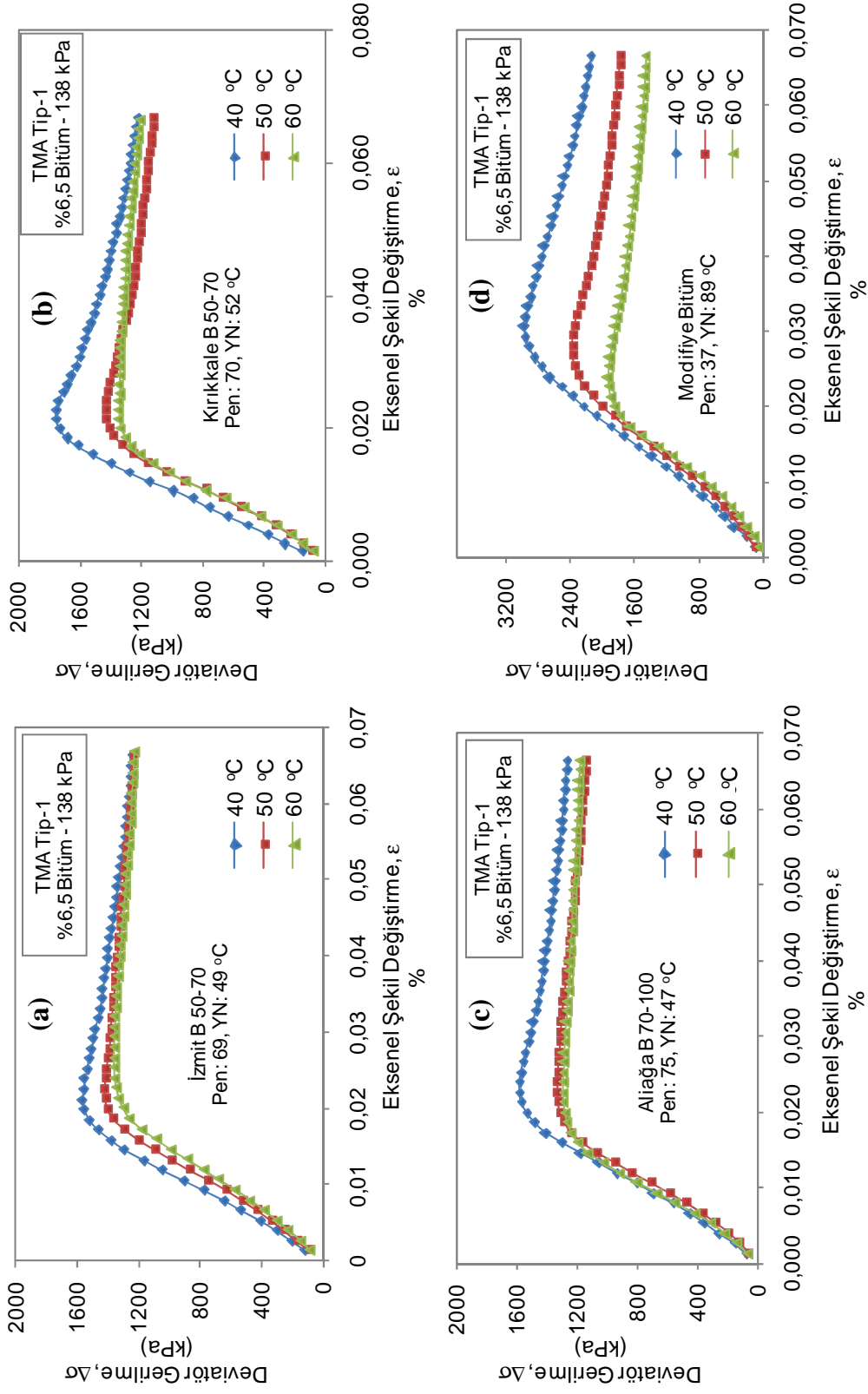


Şekil 6.9: Değişik Reolojik Özelliklere Sahip Bitüm Türleri için Uygulanan Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Programı

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de sırasıyla farklı bitümlü bağlayıcıların kullanıldığı Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 için farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, iki önemli sonuç ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.10: Üç Farklı Bitümlü Bağlayıcı Kullanılan Aşınma Tip-1 için Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) İzmit B 50-70 (b) Kırıkkale B 50-70 (c) Aliğa B 70-100



Şekil 6.11: Üç Farklı Bitümlü Bağlayıcı ve Modifiye Bitüm Kullanılan TMA Tip-1 için Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri: (a) İzmit B 50-70 (b) Kırıkkale B 50-70 (c) Aliğa B 70-100 (d) Modifiye Bitüm

- Sıcaklık arttıkça deviatör gerilme değerleri düşmektedir. Ancak burada bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası belirleyici olmaktadır.
- Yumuşama noktası aşıldıktan sonra, sıcaklık artsa bile deviatör gerilmeler arasındaki fark azalmaktadır.

TMA Tip-1 karışımlara ait Şekil 6.11'deki grafikler incelendiğinde, modifiye bitümlü karışımlarda beklendiği gibi en yüksek deformasyon direnci elde edilmiştir. Diğer bitüm türlerinde 40 °C'deki deviatör gerilme değerleri ile 50 ve 60 °C'lerdeki değerler arasındaki fark Aşınma Tip-1 karışımlardan çok daha küçüktür. 50 ve 60 °C'lerdeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri Aşınma Tip-1'e göre birbirlerine daha çok yaklaşmışlardır. Bu sonuç, bitümlü bağlayıcıların TMA karışımların deformasyon direnci üzerindeki etkisinin daha az olduğunu göstermektedir.

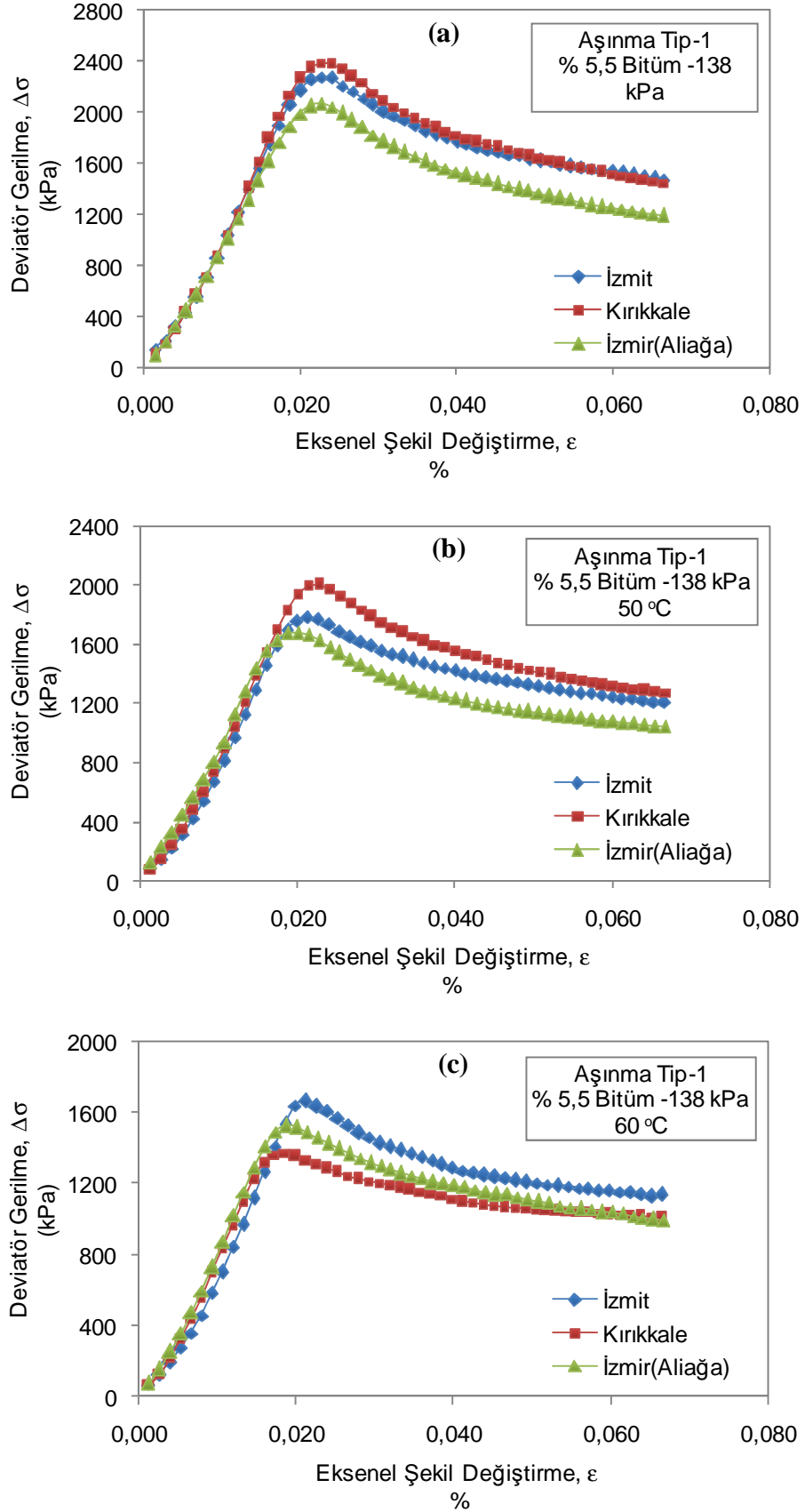
Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te sırasıyla Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1'de kullanılan bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, yukarıda yapılan değerlendirmeleri desteklediği görülmektedir.

Üç eksenli kayma mukavemeti deney sonuçları, bitümlü bağlayıcının başlıca reolojik özelliklerinin (yumuşama noktası ve penetrasyon indeks değerleri) kalıcı deformasyon direncine bilinen etkisini iyi bir şekilde açıklamaktadır.

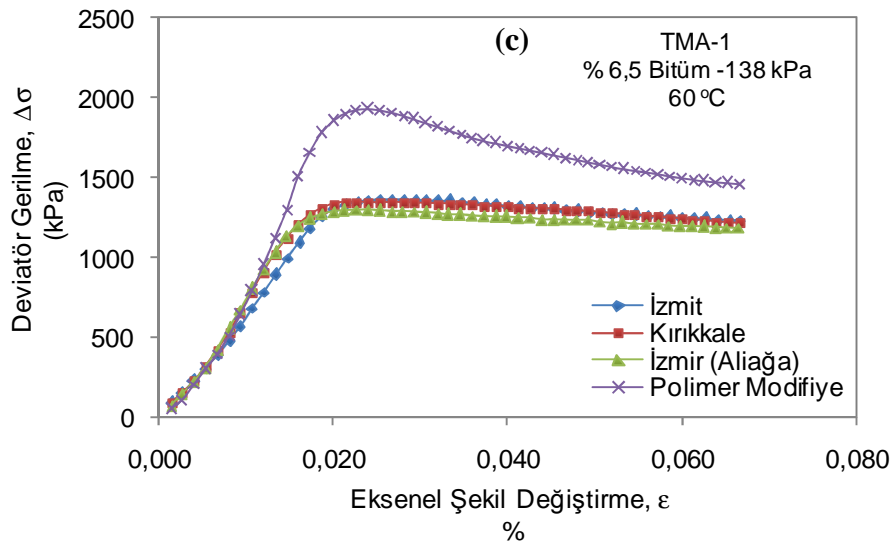
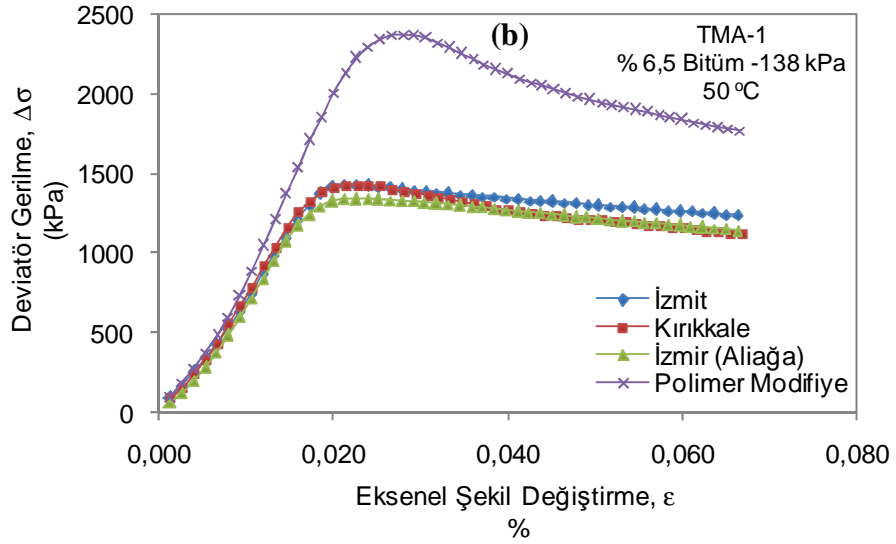
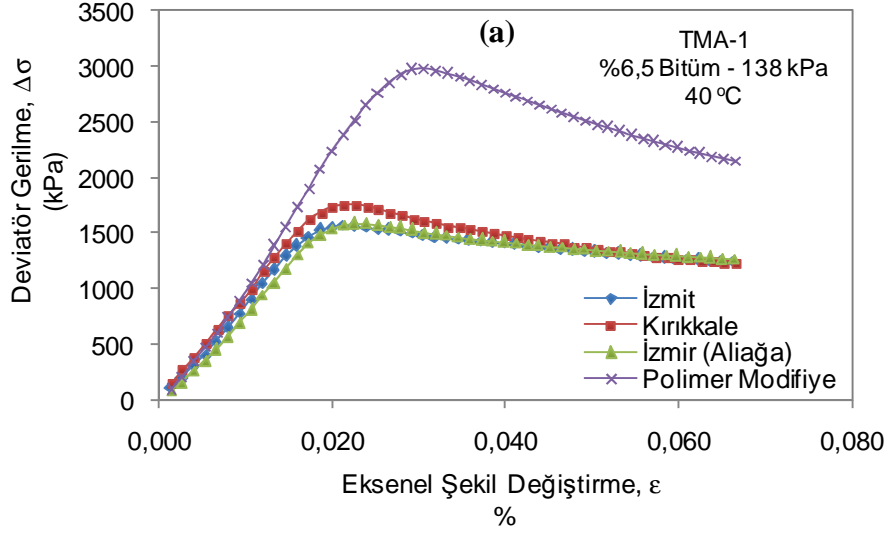
6.2.3 Kayma Parametreleri ve Oktahedral Kayma Gerilmelerinin Belirlenmesi

Önceki bölümlerde incelenen parametrelerin deformasyon direncine etkileri gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak açıklanmıştır. Bu bölümde, üç eksenli deney sonuçlarından belirlenen kayma parametreleri (c - ϕ) ve hesaplanan oktahedral kayma gerilmeleri verilmiştir. Bölüm 4.3.4'te ayrıntılı olarak açıklanan oktahedral kayma gerilmesi (τ_{oct}) asfalt kaplamada genel bir gerilme durumunda, akmanın başlangıcını tanımlamak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu terimin, kalıcı deformasyon direncinin saptanmasında kullanılması uygun olacaktır.

Her bir parametre için kohezyon (c) ve içsel sürtünme açıları (ϕ) EK B'de verilen örnekteki gibi belirlenmiştir. Bu şekilde elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açıları kullanılarak 4.25'te verilen denklem ile oktahedral kayma gerilmeleri (τ_{oct}), hesaplanmıştır. Hesaplanan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve Oktahedral kayma gerilme (τ_{oct}) değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Bu değerler, incelenen parametreler açısından değerlendirilmiş ve kalıcı deformasyon tahmin modellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

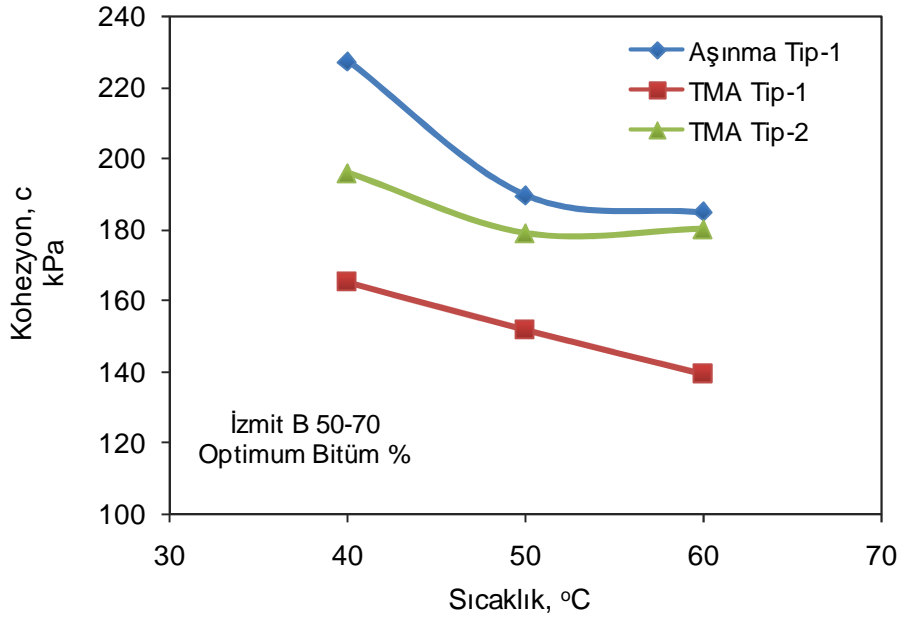


Şekil 6.12: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



Şekil 6.13: TMA Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıklardaki Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

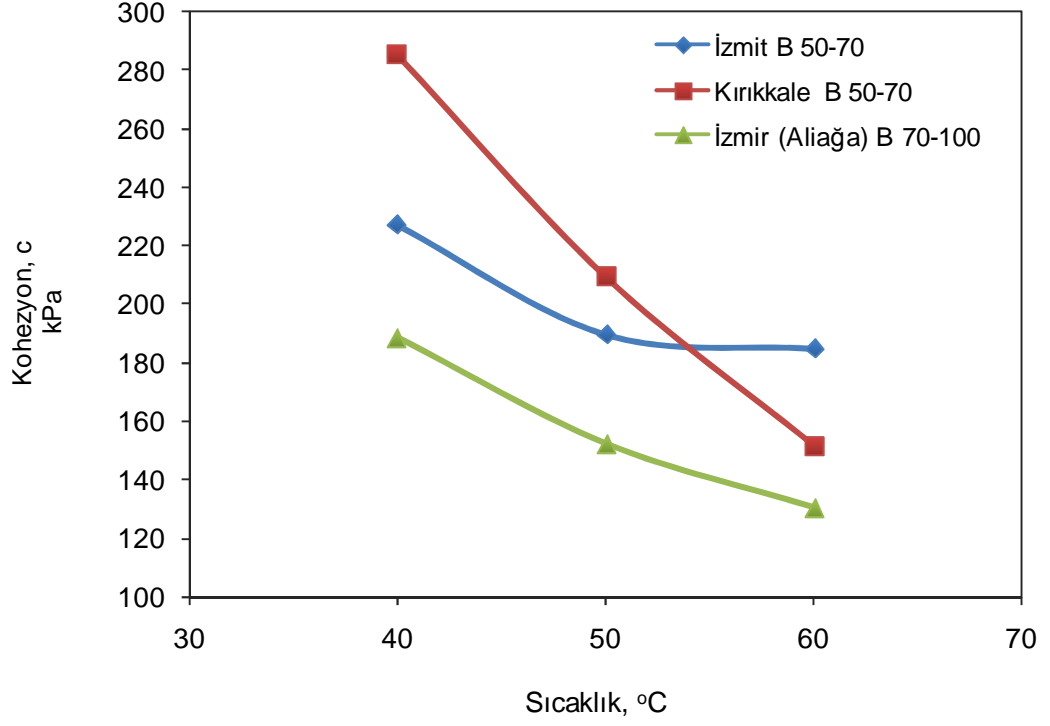
Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da verilen grafikler incelendiğinde, kohezyon değerlerinin, sıcaklığın artışıyla azalmakta olduğu görülmektedir. Bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası aşıldıktan sonra, sıcaklık artsa bile kohezyon değerlerindeki değişme miktarı azalmaktadır. Bu değişme, TMA karışımlarda Aşınma Tip-1’den daha azdır. Kohezyon değerleri gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen sonuçları yansıtmaktadır. Bitümlerin reolojik özellikleri TMA karışımlarının deformasyon direncinde daha az etkilidir. Kohezyon parametresi bitümlü bağlayıcının kıvamının kalıcı deformasyon direncine katkısını iyi bir şekilde ifade etmektedir.



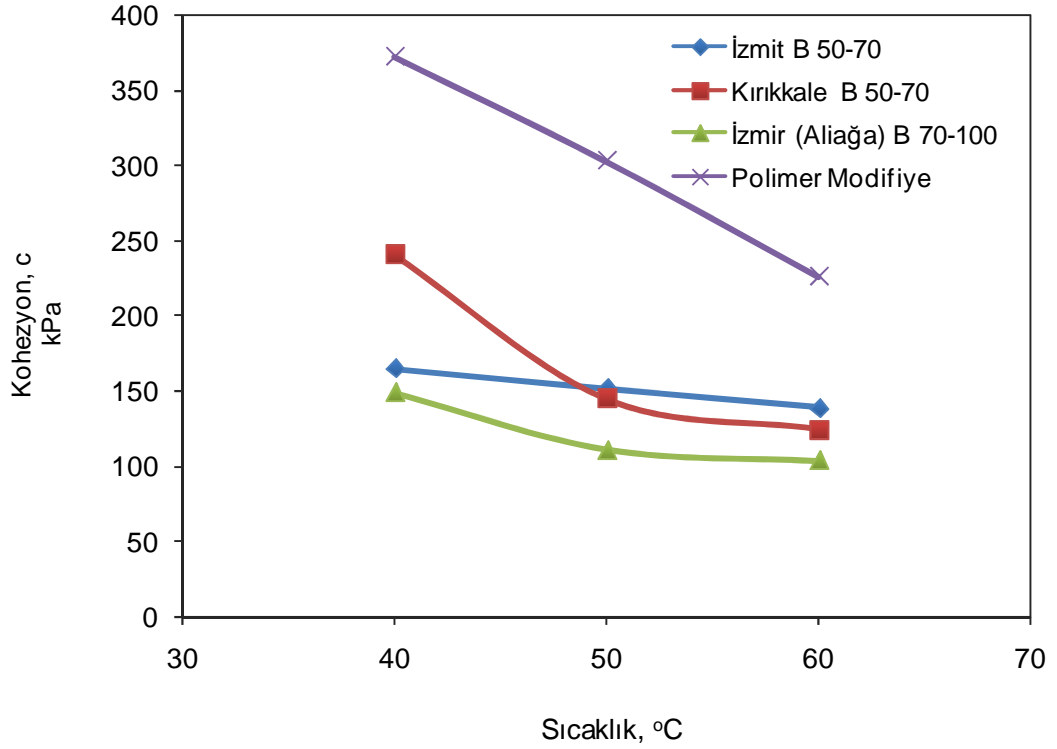
Şekil 6.14: Karışım Tiplerine ait Optimum Bitüm Yüzdesindeki Kohezyon Değerlerinin Sıcaklık ile Değişimi

Tablo 6.5’te görüldüğü gibi içsel sürtünme açıları 42–46° arasında değişmektedir. Kohezyon ve içsel sürtünme açılarının hesabından kaynaklanan hata miktarlarının belirlenmesi için standart sapmalar da hesaplanmıştır. TMA karışımların içsel sürtünme açılarının Aşınma Tip-1’e göre az da olsa büyük değerler aldığı belirlenmiştir.

Ancak TMA karışımların standart sapma değerlerinin Aşınma Tip-1’den daha küçük olduğu görülmektedir. İçsel sürtünme açısı sıcaklık değişiminden etkilenmemektedir. Bitüm yüzdesindeki artışla çok küçükte olsa içsel sürtünme açılarının azaldığı göze çarpmaktadır. İçsel sürtünme açısının, seçilen agrega tane dağılımları için ayırıcı nitelikte olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla, içsel sürtünme açısı agrega tane dağılımından daha çok, agrega tane şekli, yüzey pürüzlülüğü ve kırılma oranına bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.15: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılara ait Kohezyon Değerlerinin Sıcaklık ile Değişimi



Şekil 6.16: TMA Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılara ait Kohezyon Değerlerinin Sıcaklık ile Değişimi

Tablo 6.5: Kohezyon- İçsel Sürtünme Açısı ve Oktahedral Kayma Gerilme Değerleri

Numune Kodu	Bitüm %	Deney Sıcaklığı °C	Kohezyon, c kPa	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ^0	Oktahedral Kayma Gerilmesi, τ_{oct} kPa
A111	5,0	40	211,3	42,0	1045,8
A121	5,5	40	227,3	41,8	1111,9
A131	6,0	40	226,3	41,7	1100,6
A112	5,0	50	174,3	44,6	1010,1
A122	5,5	50	189,7	42,6	972,9
A132	6,0	50	182,8	43,8	1008,1
A113	5,0	60	150,2	44,5	865,0
A123	5,5	60	184,8	43,6	1006,7
A133	6,0	60	177,0	44,6	1025,7
A221	5,5	40	285,3	42,0	1412,1
A222	5,5	50	209,4	43,1	1106,6
A223	5,5	60	151,6	44,4	867,6
A321	5,5	40	188,5	42,5	961,0
A322	5,5	50	152,3	44,0	850,3
A323	5,5	60	130,4	44,0	728,0
S111	6,0	40	172,7	45,7	1073,2
S121	6,5	40	165,2	45,3	1000,6
S131	7,5	40	164,3	44,3	934,5
S112	6,0	50	151,5	45,4	923,5
S122	6,5	50	151,9	45,1	908,4
S132	7,5	50	109,8	44,4	628,4
S113	6,0	60	144,3	45,7	896,7
S123	6,5	60	139,5	44,7	813,5
S133	7,5	60	98,8	42,5	503,7
S221	6,5	40	241,1	45,4	1469,7
S222	6,5	50	145,0	43,9	804,6
S223	6,5	60	124,9	44,7	728,4
S321	6,5	40	149,0	44,1	837,0
S322	6,5	50	111,4	44,2	629,7
S323	6,5	60	103,8	44,5	597,8
S421	6,5	40	372,5	42,2	1865,6
S422	6,5	50	303,0	42,7	1563,3
S423	6,5	60	226,5	45,0	1346,0
S'111	6,5	40	202,9	44,6	1175,8
S'121	7,0	40	195,8	44,2	1106,8
S'131	7,5	40	195,0	43,7	1068,8
S'112	6,5	50	182,9	45,2	1100,8
S'122	7,0	50	178,8	44,4	1023,3
S'132	7,5	50	161,7	44,4	925,4
S'113	6,5	60	177,5	46,3	1146,7
S'123	7,0	60	180,0	45,1	1076,5
S'133	7,5	60	149,1	44,7	869,5

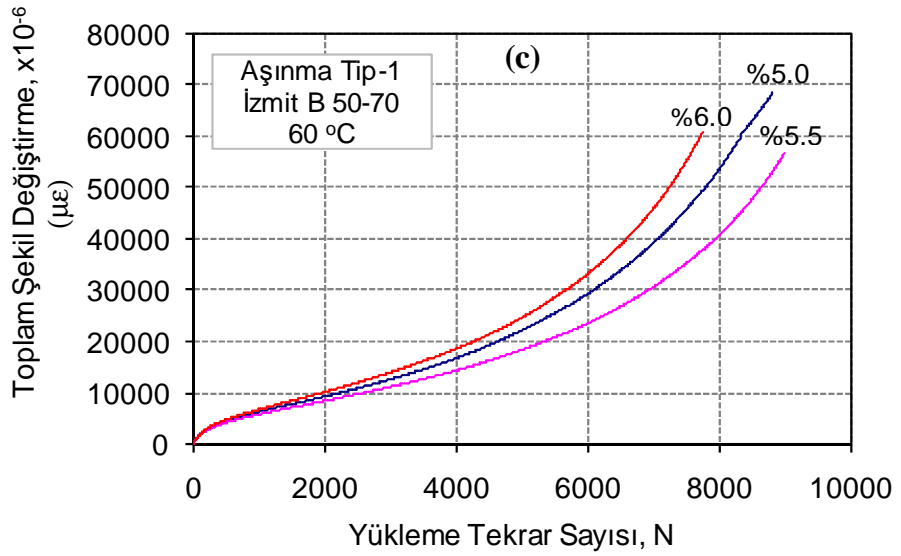
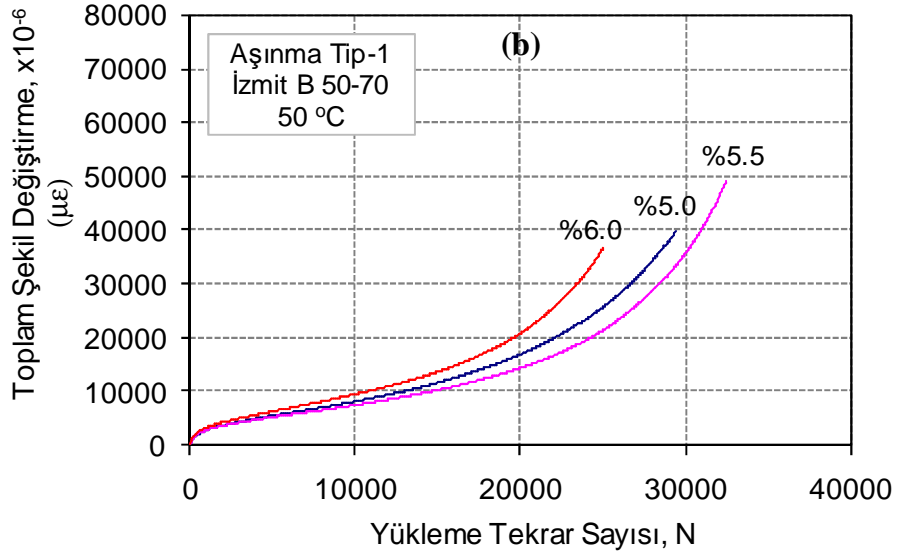
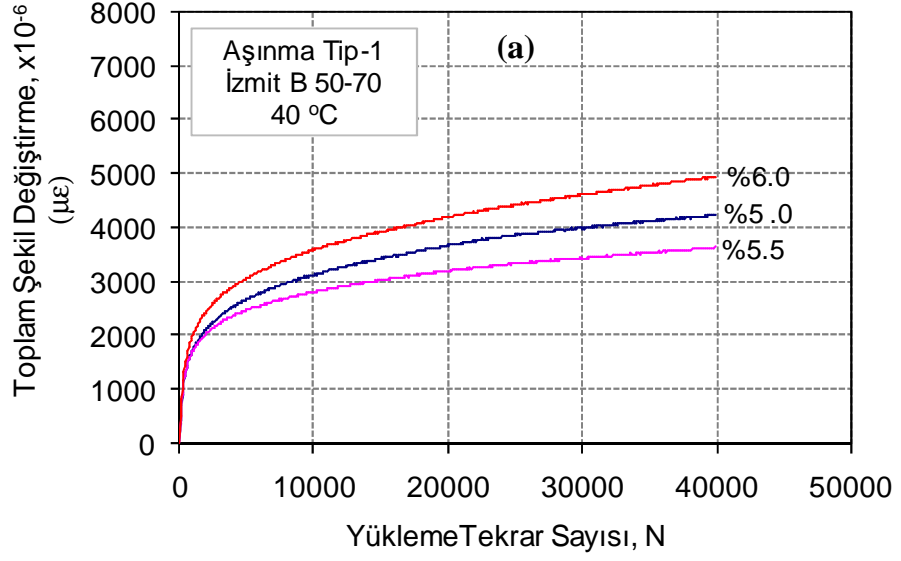
6.3 Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Sonuçları

Kalıcı deformasyon direncinin tahmininde kullanılan deneyler arasında yer alan tek eksenli tekrarlı sünme (TTS) deneyi, üç eksenli kayma mukavemeti (ÜKM) deneyinde kullanılan her bir karışım parametresi için 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Her parametre değişimi için üç numunenin kullanıldığı bu bölümde toplam 135 adet numune test edilmiştir. Numunelerin birim hacim ağırlık ve boşluk değerleri EK E'de verilmiştir. TTS deneyinden elde edilen veriler kullanılarak, yükleme tekrar sayısına karşılık gelen toplam birim şekil değiştirme oranı ve sünme rijitliği (modülü) grafikleri çizilmiştir. Sünme Rijitliği, bitümlü sıcak karışımın şekil değiştirme direncinin bir göstergesidir. Deneyde uygulanan gerilmenin (σ) toplam birim deformasyona (ϵ) oranını ile ifade edilen sünme rijitliği her bir yükleme tekrar sayısı için belirlenmiştir. Bu bölümde, toplam birim deformasyon grafikleri verilmiş, sünme rijitliği grafikleri ise EK F'de sunulmuştur. Deney sonuçları incelenen parametreler açısından iki grupta değerlendirilmiştir.

6.3.1 Agregata Tane Dağılımı ve Bitüm Yüzdesinin Karışımın Deformasyon Direncine Etkisi

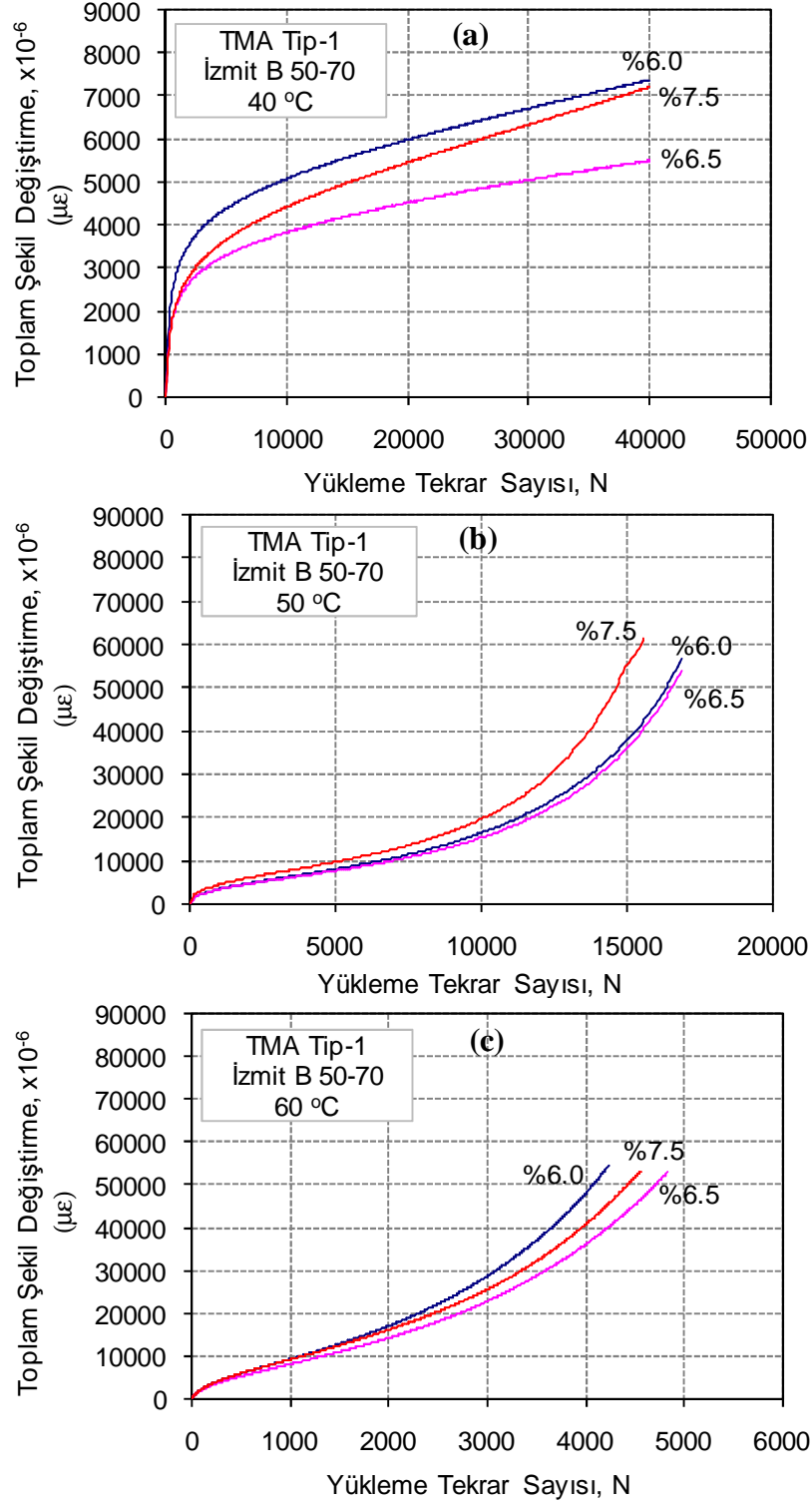
Bu gruptaki deneyler, agregata tane dağılımının ve bitüm yüzdesinin deformasyon direnci üzerindeki etkilerini belirlemek üzere ÜKM deneyinin uygulandığı karışım tipleri, bitüm yüzdeleri ve deney sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.17'de verilen Aşınma Tip-1 numunelerine ait tekrarlı sünme deneyi sonuçlarında, tüm sıcaklıklarda en düşük toplam şekil değiştirme oranı %5,5 bitüm miktarında elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça toplam şekil değiştirme miktarı büyük oranda artmaktadır. 40 °C'de yapılan deneylerde 40000 yükleme tekrarı sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde, Bölüm 3.3.4'te tanımlanan üçüncül akma bölgesine ulaşılmazken, 50 ve 60 °C sırasıyla yaklaşık 15000 ve 4000 yükleme tekrarından sonra üçüncül akma bölgesine ulaşılmıştır. Bu deney sonuçları, bitüm yüzdesi açısından üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden elde edilen sonuçlar ile uyum içerisindedir. Tekrarlı sünme deneyi, bitüm yüzdesinin kalıcı deformasyon direnci üzerindeki etkisini iyi bir şekilde yansıtmaktadır. EK F'de verilen grafikler incelendiğinde Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 için en yüksek sünme rijitliği değerleri sırasıyla %5,5, %6,5 ve %7,0 bitüm miktarlarında elde edilmiştir. Sünme Modülü değerleri tekrar sayısı azalmaktadır. Bu azalma miktarı 40 °C'de küçük oranda iken, üçüncül akma bölgesine çok kısa tekrar sayılarında ulaşılan 50 ve 60 °C'lerde büyük oranda bir azalma görülmektedir. 50 ve 60 °C sıcaklıklardaki modül değerleri tüm bitüm yüzdeleri için birbirine oldukça yakındır.

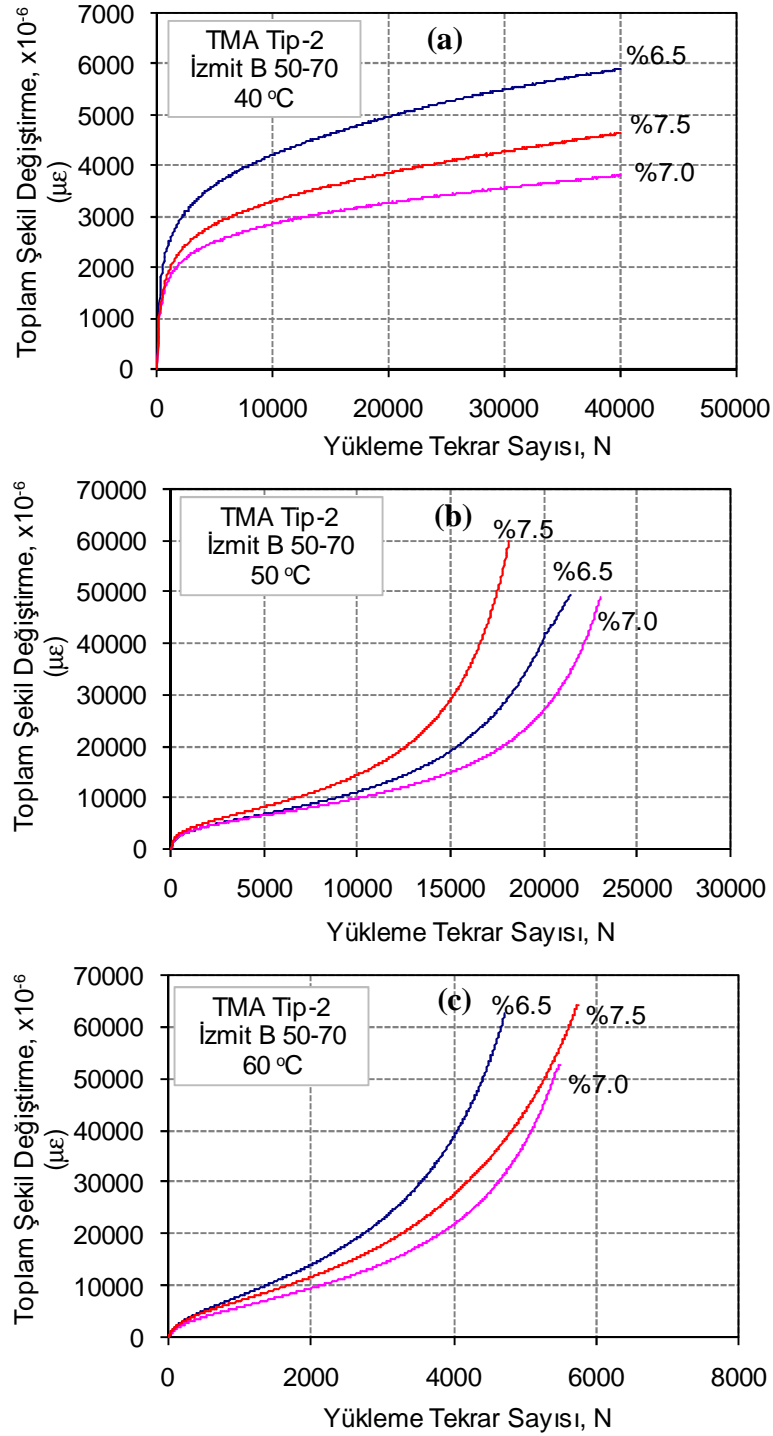


Şekil 6.17: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Toplam Şekil Değişirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da verilen grafiklerden sırasıyla TMA Tip-1’de en iyi deformasyon direncinin %6,5, TMA Tip-2’de ise %7,0 bitüm oranından elde edildiği gözlenmektedir. Bu sonuçlar, TMA karışımların üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçları ile benzerdir.



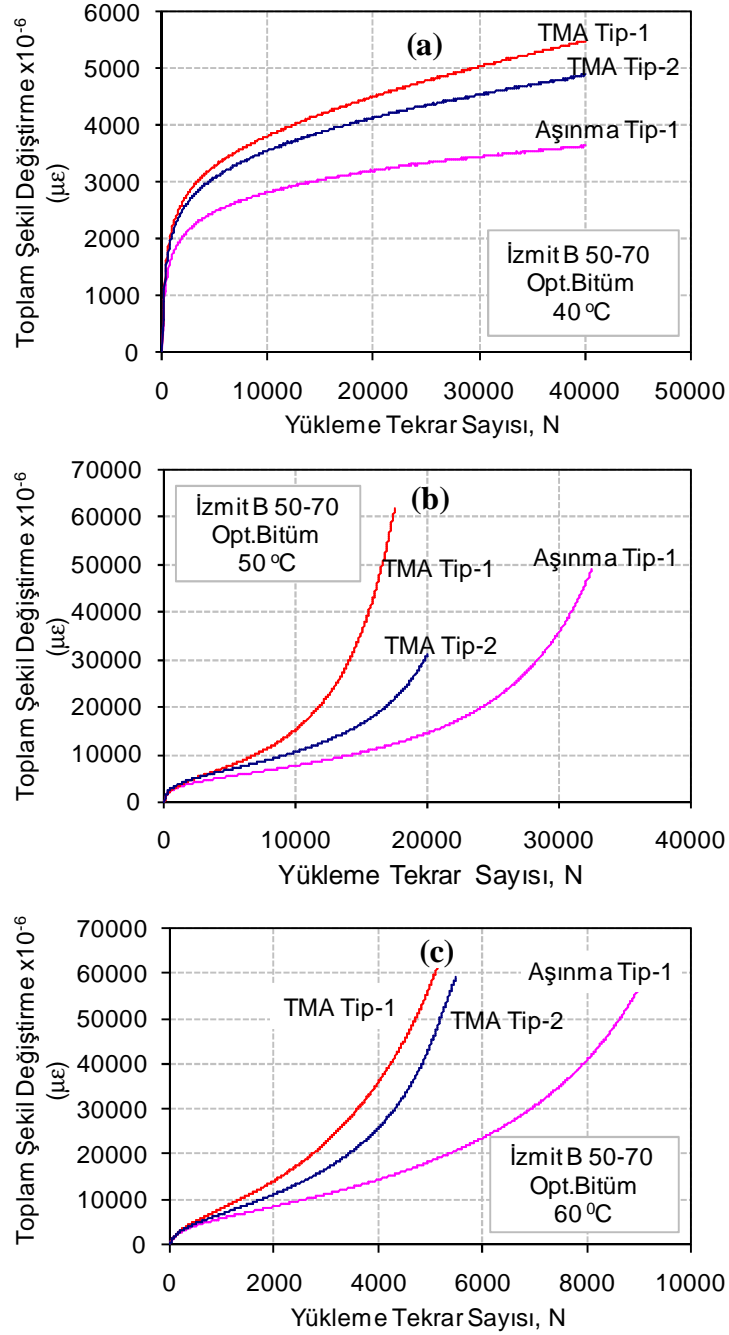
Şekil 6.18: TMA Tip-1’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Toplam Şekil Değişirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



Şekil 6.19: TMA Tip-2’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Toplam Şekil Değişirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

Karışım tiplerinin deformasyon dirençlerinin karşılaştırıldığı Şekil 6.20’deki toplam şekil değişirme grafikleri incelendiğinde, en düşük şekil değişirme miktarının Aşınma Tip-1 karışımından, en büyük şekil değişirme miktarının ise TMA Tip-1 karışımından elde edildiği görülmektedir. Bu sıralama ÜKM deneyindeki sıralamanın aynısıdır. Fakat 40 °C’de yapılan ÜKM deneyinde Aşınma Tip-1 ve

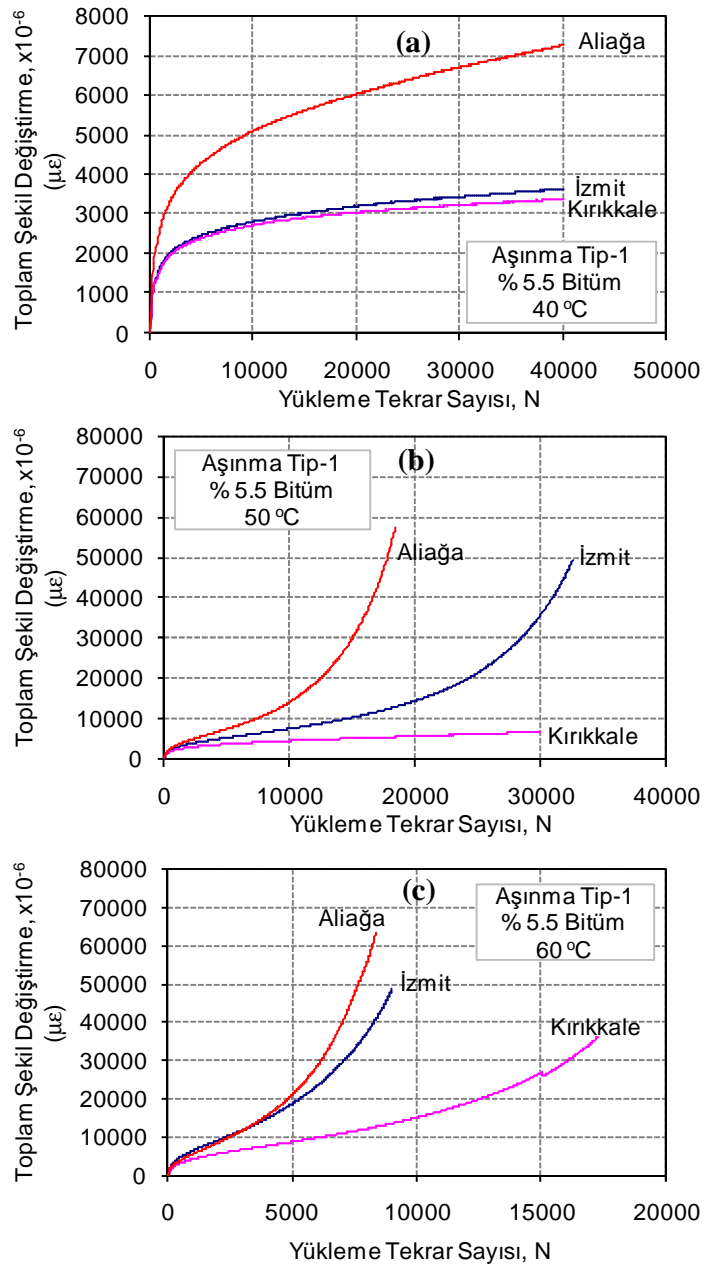
TMA karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasındaki fark 50 ve 60 °C’lerde oldukça azalmaktadır. Bununla beraber, numune kırıldıktan sonra gerilme değerinde ani bir düşme göstermeyen TMA karışımların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin altına düşmektedir. Buna karşılık, 50 ve 60 °C’lerde ki tekrarlı sünme deneyi sonuçlarında, TMA karışımlar Aşınma Tip-1 karışımlara göre daha kısa sürede daha büyük şekil değiştirmelere uğramaktadır. Dolayısıyla, TTS deneyinde numuneye yanal basınç uygulanmadığından, tane dağılımının kalıcı deformasyon direncine olan olumlu etkisi gözlenmemektedir.



Şekil 6.20: Karışım Tiplerine ait Farklı Sıcaklıklardaki Toplam Şekil Değiştirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

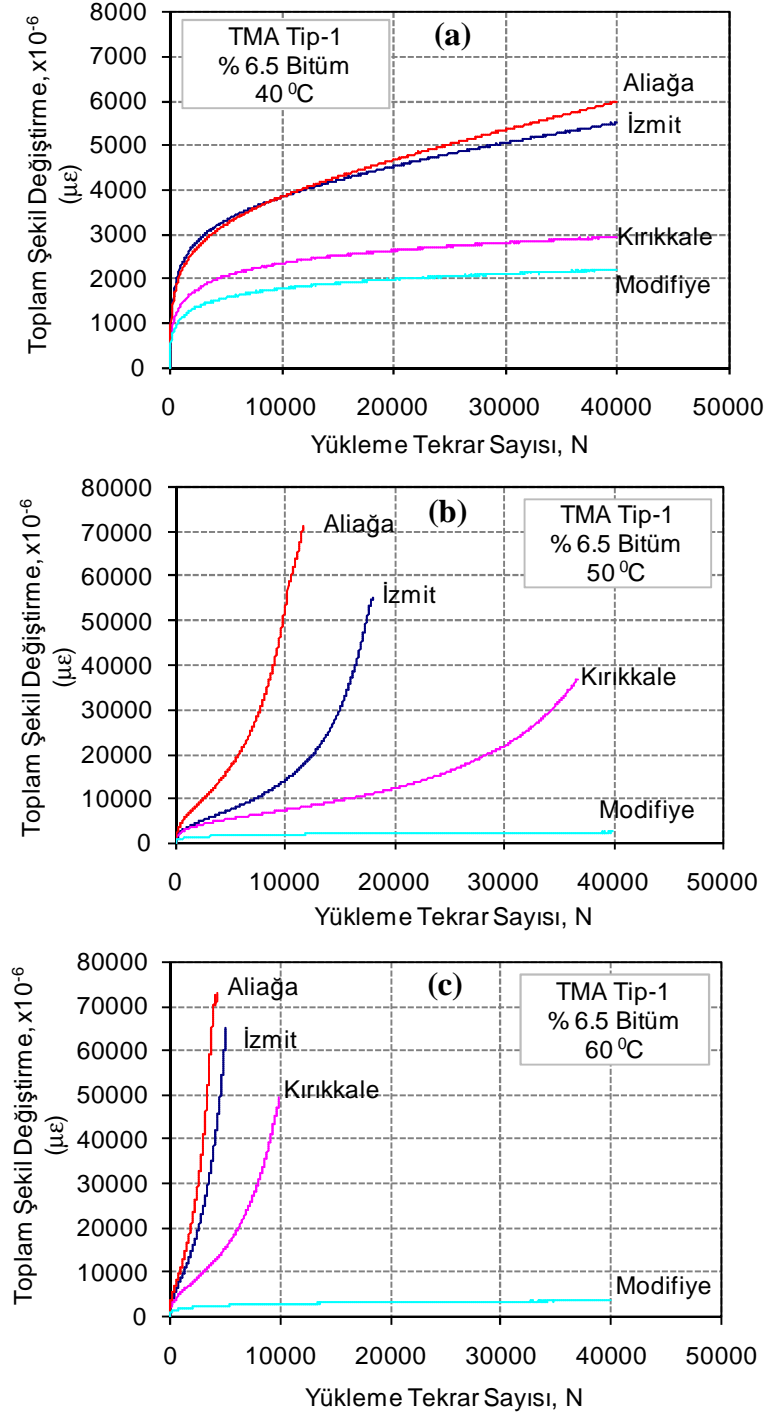
6.3.2 Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özelliklerinin Karışımın Deformasyon Direncine Etkisi

Değişik bitüm türlerinin kullanıldığı bu gruptaki deneyler, Aşınma Tip-1 ve TMA Tip-1 karışımları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.21’de, tüm sıcaklıklarda Aşınma Tip-1 için en iyi sonuçlar sırasıyla Kırıkkale B 50-70, İzmit B 50-70 ve İzmir (Aliağa) B 70-100 bitümlerinin kullanıldığı karışımlardan elde edilmiştir. Kırıkkale B 50-70 bitümü ile hazırlanan numuneler üzerinde 50 °C’de yapılan deneylerde 40000 tekrar sonunda üçüncül akma bölgesine ulaşılmamıştır. Bunun sebebi, Kırıkkale B 50-70’in yumuşama noktasının 50 °C’den büyük olmasıdır.



Şekil 6.21: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıktaki Toplam Şekil Değişirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

TMA Tip-1’de ise Şekil 6.22’de görüldüğü gibi deneylerin yapıldığı sıcaklıkların tamamında yumuşama noktası 89 °C olan modifiye bitüm en az şekil değiştirme miktarı göstermiş ve 40000 vuruş sonunda üçüncül akma bölgesine ulaşılmamaktadır. Modifiye bitüm, beklendiği gibi diğer bağlayıcılara göre karışımın deformasyon direncini büyük oranda artırmaktadır. Katkisız bitümlü bağlayıcılar için sıralama Aşınma Tip-1’deki gibidir.



Şekil 6.22: TMA Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıktaki Toplam Şekil Değiştirme Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

6.4 Kalıcı Deformasyon Tahmin Modelinin Geliştirilmesi

Kaplamada kullanılan her bir malzeme için regresyon denklemlerinin geliştirilmesi pahalı ve zaman alıcıdır. Bu sebeple, malzeme ve karışım özelliklerinin ve çevresel koşulların etkilerini ifade eden parametrelerin yer aldığı genelleştirilmiş modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bölüm 3.3.4'te anlatıldığı üzere farklı deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak malzeme ve karışım parametrelerini içeren birçok matematiksel ve istatistiksel kalıcı deformasyon tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin genellikle, kalıcı deformasyon miktarı ile yükleme tekrar sayısı arasındaki denklem 6.1'deki temel üstsel ilişkiyi geliştirmeye yönelik olduğu görülmektedir.

$$\varepsilon_p = a \cdot N^b \quad (6.1)$$

ε_p : Kalıcı deformasyon miktarı

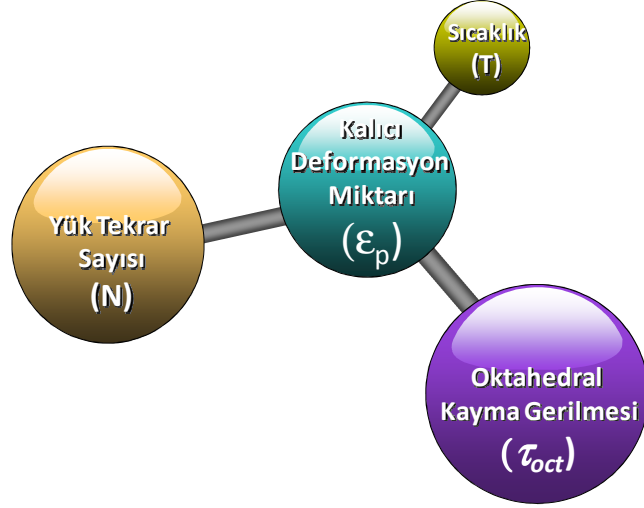
N : Yükleme tekrar Sayısı

a, b : Malzeme özelliklerine ait model sabitleri

Bu çalışma, üç eksenli kayma mukavemeti deneyi sonuçlarının malzeme ve karışım özelliklerinin deformasyon davranışına etkilerini çok iyi yansıttığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla, üç eksenli kayma mukavemeti deneyinden elde edilen kayma parametresinin yer aldığı modeller daha gerçekçi tahminler ve geniş kullanım alanı sağlayacaktır. Bu bağlamda, üç eksenli kayma mukavemeti (ÜKM) deneyi sonuçları ve tek eksenli tekrarlı sünme (TTS) deneyi sonuçları kullanılarak kalıcı deformasyon tahmin modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen kalıcı deformasyon tahmin modellerinin oluşturulmasında:

- ❖ ÜKM deney sonuçlarından hesaplanan ve asfalt kaplamada genel bir gerilme durumu için akmanın başlangıcını tanımlayan oktahedral kayma gerilmesi (τ_{okt})
- ❖ TTS deneylerinde, 40 °C'de 40000 tekrar sayısındaki toplam birim şekil değiştirme değerleri, 50 ve 60 °C'lerde ise akmanın başlama noktasını tanımlayan üçüncül akma bölgesi başlangıcındaki toplam birim şekil değiştirme miktarları ve tekrar sayıları kullanılmıştır.

TTS deneyinin agrega tane dağılımının etkisini yansıtmaması sebebiyle kalıcı deformasyon tahmin modelinin Aşınma Tip-1 ve TMA karışımlar için ayrı ayrı oluşturulması daha uygun görülmüştür. Kalıcı deformasyon tahmin modelinin parametreleri arasındaki ilişkilerin incelendiği istatistiksel analizler sonucunda belirlenen en uygun parametreler Şekil 6.23'teki diyagramda görülmektedir.



Şekil 6.23: Kalıcı Deformasyon Tahmin Modelinin Parametreleri

Toplam şekil değiştirme miktarı, yükleme tekrar sayısı, oktahedral kayma gerilmesi, ve sıcaklık parametreleri üzerinde yapılan doğrusal çoklu regresyon analizi sonucunda, kalıcı deformasyon tahmin modeli için 6.2 eşitliğinde verilen logaritmik form belirlenmiştir.

$$\log \varepsilon_p = a + b \log N + c \log \tau_{okt} + d \log T \quad (6.2)$$

Bu denklemde,

- ε_p : Toplam kalıcı deformasyon oranı
- N : Yükleme tekrar sayısı
- τ_{okt} : Oktahedral kayma gerilmesi, kPa
- T : Deneysel (Kaplama) sıcaklığı, °C

Aşınma Tip-1 için yapılan regresyon analizi sonuçları, aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Tablo 6.6'da verilen model değişkenlerinin korelasyon matrisi incelendiğinde, modeldeki değişkenlerin kalıcı deformasyon miktarını yeterli düzeyde açıkladığı görülmektedir.

Tablo 6.6: Aşınma Tip-1 için Geliştirilen Kalıcı Deformasyon Modelinin Korelasyon Matrisi

Değişkenler	Log ε_p	Log τ	Log N	Log T
Log ε_p (Kalıcı Deformasyon Miktarı)	1,000	-0,435	0,590	0,427
Log τ (Oktahedral Kayma Gerilmesi)	-0,435	1,000	0,277	-0,674
Log N (Yükleme tekrar Sayısı)	0,590	0,277	1,000	-0,355
Log T (Sıcaklık)	0,427	-0,674	-0,355	1,000

Tablo 6.7’de görüldüğü gibi, R^2 ve F değerleri oluşturulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Modelin katsayıları Tablo 6.8’de verilmiştir. Katsayıların t-istatistiklerinin anlamlılık düzeyleri oldukça yüksektir.

Tablo 6.7: Aşınma Tip-1 için Geliştirilen Kalıcı Deformasyon Modelinin Anlamlılık Düzeyi

R^2	Ayarlanmış R^2	Tahminin Standart Hatası	Değişim İstatistikleri				
			R^2 Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Anlamlılık Değişimi
0,870	0,868	0,10254477	0,870	489,048	3	219	0,000

Tablo 6.8: Aşınma Tip-1 için Geliştirilen Kalıcı Deformasyon Modelinin Katsayıları

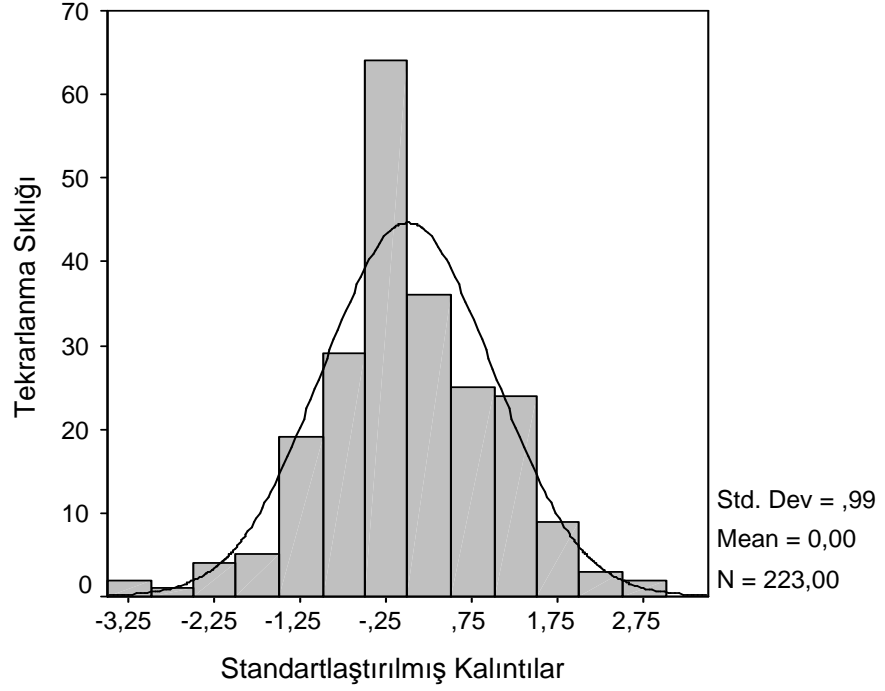
Değişkenler	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar β	t	Katsayıların Anlamlılık Düzeyleri	Katsayıların %95 Güven Aralığı	
	Katsayılar	Standart Hata				Alt Sınır	Üst Sınır
Model Sabiti	-3,522	0,536		-6,566	0,000	-4,579	-2,465
Log τ	-1,189	0,119	-0,329	-9,960	0,000	-1,425	-0,954
Log N	0,370	0,011	0,862	33,060	0,000	0,348	0,392
Log T	2,024	0,134	0,511	15,054	0,000	1,759	2,289

Tablo 6.8’deki katsayılar kullanılarak Aşınma Tip-1 için geliştirilen modelin denklemi 6.3’teki gibidir. TMA Tip-1 için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin son hali 6.4 nolu denklemde verilmiştir.

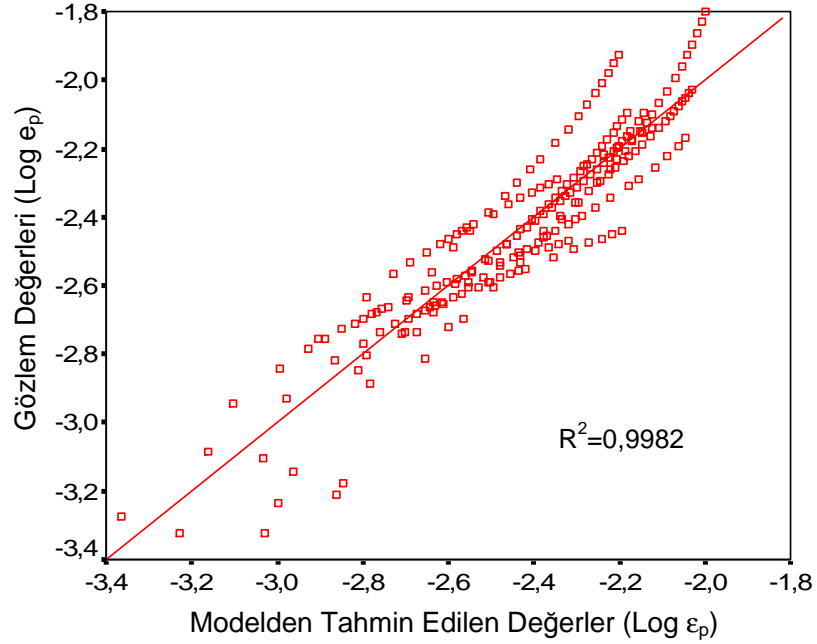
$$\log \varepsilon_p = -3,522 + 0,370 \cdot \log N - 1,189 \cdot \log \tau_{okt} + 2,024 \cdot \log T \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_p = \frac{3,01 \cdot (N)^{0,370} \cdot (T)^{2,024}}{(\tau_{okt})^{1,189} \cdot 10^4} \quad (6.4)$$

Regresyon modelinden elde edilen kalıntıların normal dağılıma uyduğu Şekil 6.24’te verilen histogramda görülmektedir. Şekil 6.25’te verilen tahmin edilen değerlerle gözlenen değerler arasında ilişki, modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.24: Aşınma Tıp-1 için Geliştirilen Regresyon Tahmin Modelinde Standartlaştırılmış Kalıntılarının Histogramı



Şekil 6.25: Aşınma Tıp-1 için Gözlenen Şekil Değiştirme Değerine Karşılık Regresyon Tahmin Modelinden Elde Edilen Değerler ($\text{Log } \epsilon_p$)

TMA karışımlar için yapılan regresyon analizi sonuçları, Tablo 6.9, Tablo 6.10 ve Tablo 6.11’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, modeldeki değişkenlerin kalıcı deformasyon miktarını yeterli düzeyde açıkladığı, R^2 değerinin 0,82 ve F’in

anlamlılık değişiminin 0,05 değerinden çok küçük olması, oluşturulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Tablo 6.11’de verilen modelin katsayılarının t-istatistiklerinin anlamlılık düzeyleri oldukça yüksektir.

Tablo 6.9: TMA Karışımlar için Geliştirilen Kalıcı Deformasyon Modelinin Korelasyon Matrisi

Değikenler	Log ϵ_p	Log τ	Log N	Log T
Log ϵ_p (Kalıcı Deformasyon Miktarı)	1,000	-0,629	0,326	0,337
Log τ (Oktahedral Kayma Gerilmesi)	-0,629	1,000	0,388	-0,432
Log N (Yükleme tekrar Sayısı)	0,326	0,388	1,000	-0,352
Log T (Sıcaklık)	0,337	-0,432	-0,352	1,000

Tablo 6.10: TMA Karışımlar için Geliştirilen Kalıcı Deformasyon Modelinin Anlamlılık Düzeyi

R^2	Ayarlanmış R^2	Tahminin Standart Hatası	Değişim İstatistikleri				
			R^2 Değişimi	F Değişimi	df1	df2	F Anlamlılık Değişimi
0,824	0,822	0,14301517	0,824	460,131	3	295	0,000

Tablo 6.11: TMA Karışımların Kalıcı Deformasyon Modelinin Katsayıları

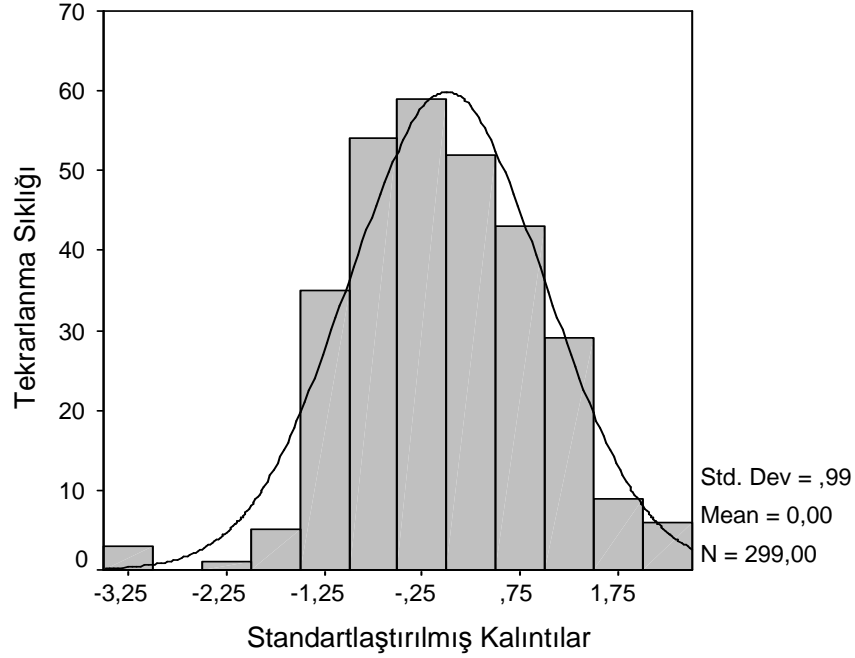
Değişkenler	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar β	t	Katsayıların Anlamlılık Düzeyleri	Katsayıların %95 Güven Aralığı	
	Katsayılar	Standart Hata				Alt Sınır	Üst Sınır
Model Sabiti	-0,242	0,336		-0,720	0,472	-0,903	0,419
Log τ	-1,767	0,062	-0,803	-28,475	0,000	-1,889	-1,644
Log N	0,333	0,012	0,724	26,634	0,000	0,308	0,357
Log T	1,146	0,130	0,245	8,806	0,000	0,890	1,402

Tablo 6.11’deki katsayılar kullanılarak TMA karışımlar için geliştirilen modelin denklemi 6.5’teki gibidir. TMA karışımlar için geliştirilen kalıcı deformasyon modelinin son hali 6.6 nolu denklemde verilmiştir.

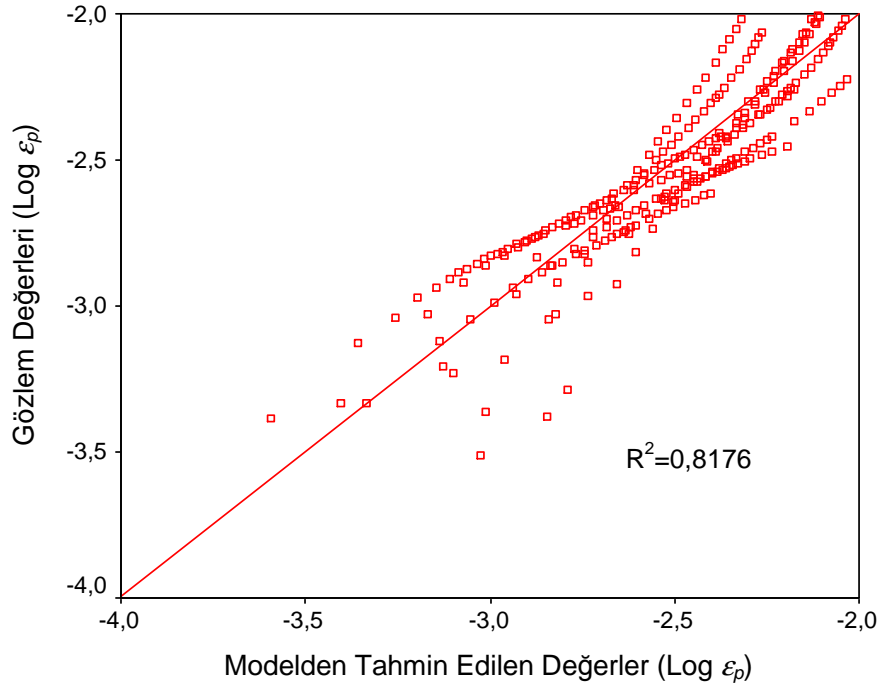
$$\log \epsilon_p = -0,242 + 0,333 \log N - 1,767 \log \tau_{okt} + 1,146 \log T \quad (6.5)$$

$$\epsilon_p = \frac{0,573 \cdot (N)^{0,333} \cdot (T)^{1,146}}{(\tau_{okt})^{1,767}} \quad (6.6)$$

TMA karışımlar için oluşturulan regresyon modelinden elde edilen kalıntıların normal dağılıma uyduğu Şekil 6.26'daki histogramda görülmektedir. Şekil 6.27'de modelden tahmin edilen değerlerle deneyden elde edilen değerler arasında iyi bir ilişki gözlenmektedir.



Şekil 6.26: TMA Karışımlar için Regresyon Tahmin Modelinin Standartlaştırılmış Kalıntılarının Histogramı



Şekil 6.27: TMA Karışımlar için Gözlenen Şekil Değiştirme Değerine Karşılık Regresyon Tahmin Modelinden Elde Edilen Değerler (Log ϵ_p)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bitümlü sıcak karışımların deformasyon direncinin üç eksenli kayma mukavemeti deneyi ile incelendiği bu çalışmada, agrega tane dağılımı, bitüm yüzdesi, bitümlü bağlayıcı kıvamı ve sıcaklığın etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla çalışmada, Karayolu Teknik Şartnamesinde yer alan Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımları ile farklı rafinerilerden alınan İzmit B 50-70, Kırıkkale B 50-70 ve İzmir (Aliağa) B 70-100 bitümlü bağlayıcılar ve polimer modifiye bitüm kullanılmıştır. Karışım tipleri ve bitümlü bağlayıcılar için Marshall tasarımları yapılmış, çift taraflı statik sıkıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde üç eksenli kayma mukavemeti ve tek eksenli tekrarlı sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Marshall yöntemi TMA karışımlar gibi özel kaplama tiplerinin değerlendirilmesinde yetersiz kalmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesinde, TMA karışımlar için yapılan Marshall tasarımı yalnızca bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, bitümlü karışımların gerçek özelliklerini yansıtan temel bir deney olarak, üç eksenli kayma mukavemeti (ÜKM) deneyinin karışım tasarımda kullanılabilirliği ve özellikle kalıcı deformasyon direncinin tahminindeki uygunluk derecesinin belirlenmesi amacı ile yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ❖ Aşınma Tip-1 ve TMA karışımlar için 150 mm yükseklikli numunelerin hazırlanmasında uygulanacak statik sıkıştırma basınçları sırasıyla 35 MPa ve 25 MPa olarak belirlenmiştir. Çift taraflı statik sıkıştırma ve Marshall sıkıştırıcısı ile hazırlanan numunelerin birim hacim ağırlık ve Marshall tasarım değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.
- ❖ Aşınma Tip-1, TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 karışımlar için en yüksek deviatör gerilme değerleri sırasıyla, %5,5, %6,5 ve %7,0 bitüm oranlarından elde edilmiştir. Bu değerler, Marshall tasarımlarında bulunan optimum bitüm yüzdeleri ile uyum içerisindedir.
- ❖ ÜKM deney sonuçlarından, sıcaklık arttıkça deviatör gerilme değerlerinin düştüğü ve bunda bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasının belirleyici olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yumuşama noktasındaki artışın şekil değiştirme miktarını

azalttığı saptanmıştır. Yumuşama noktası aşıldıktan sonra, sıcaklık artsa bile deviatör gerilmeler arasındaki fark azalmaktadır.

- ❖ Sıcaklık değişimlerinde deviatör gerilmeler arasındaki fark TMA karışımlarda Aşınma Tip-1'e göre daha azdır. TMA karışımlar maksimum deviatör gerilme değerine ulaştıktan sonra çok az bir dayanım kaybına uğramaktadır. Dolayısıyla, 50 ve 60 °C'lerinde TMA karışımların deformasyon direnci Aşınma Tip-1'den daha büyüktür. Bu sonuçlar, bitümlü bağlayıcıların TMA karışımların deformasyon direnci üzerindeki etkisinin daha az olduğunu ve karışımların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinde iri agrega miktarının olumlu etkisini ortaya koymaktadır.
- ❖ ÜKM deneyi sonuçları kullanılarak çizilen Mohr daireleri ve kırılma zarfından her bir parametre için kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Kohezyon parametresi bitümlü bağlayıcının kıvamının karışım matrisinin kalıcı deformasyon direncine bilinen etkisini iyi bir şekilde ifade etmektedir. İçsel sürtünme açısı sıcaklık değişiminden etkilenmemektedir. Bitüm yüzdesindeki artışla çok küçük de olsa içsel sürtünme açılarının azaldığı göze çarpmaktadır. İçsel sürtünme açısının agrega tane dağılımından daha çok tane şekli, yüzey pürüzlülüğü ve kırılma oranına bağlı olduğu sonucuna varılmaktadır.
- ❖ ÜKM deneyleri, agrega tane dağılımı ve bitümlü bağlayıcı yüzdesi ile bitümlü bağlayıcının başlıca reolojik özelliklerinin (yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi değerleri) kalıcı deformasyon direncine bilinen etkisini yansıtmakta ve bitümlü sıcak karışımların gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin ve deformasyon direncinin belirlenmesinde gerçekçi sonuçlar vermektedir.
- ❖ Tek eksenli tekrarlı sünme deneyi sonuçlarından, ÜKM deneyinde maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği bitüm yüzdeleri için en düşük şekil değiştirme miktarları elde edilmiştir. 40 °C'de yapılan tek eksenli tekrarlı sünme deneylerinde 40000 yükleme tekrarında üçüncül akma bölgesine ulaşılmamış, 50 ve 60 °C'lerde ise modifiye bitümlü karışımlar haricinde tüm karışımlarda çok kısa bir süreçte üçüncül akma bölgesine ulaşılmıştır. Dolayısıyla, bu deney sonuçları 40 °C ÜKM deney sonuçlarına paralel sonuçlar vermektedir. 50 ve 60 °C'lerde ise ÜKM deney sonuçlarının aksine, TMA karışımlar Aşınma Tip-1 karışımlarına göre daha kısa sürede daha büyük deformasyonlara uğramaktadır.
- ❖ Tek eksenli tekrarlı sünme deneyi, bitümlü bağlayıcının deformasyon direncine katkısını ortaya koymaktadır. Fakat numuneye yanal basınç uygulanmaması sebebiyle tane dağılımının kalıcı deformasyon direncine etkisini yansıtmamaktadır.

- ❖ Her bir karışım için sünme deneylerinin gerçekleştirilmesinin zaman ve maliyet açısından zorluğu dikkate alınarak, bu çalışmada sıcaklık ve oktahedral kayma gerilmesi içeren genelleştirilmiş modeller sunulmuştur.
- ❖ İstatistiksel çözümler sonucunda, tek eksenli tekrarlı sünme deneyinden elde edilen toplam kalıcı deformasyon değerleri ve kayma gerilmeleri arasında iyi derecede bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç ve istatistiksel analizlere dayanarak Aşınma Tip-1 ve TMA karışımlar için oktahedral kayma gerilmesi, yükleme tekrar sayısı ve sıcaklık parametrelerini içeren iki ayrı kalıcı deformasyon tahmin modeli geliştirilmiştir. Aşınma Tip-1 için $R^2 = 0,87$, TMA Tip-1 için ise $R^2=0,82$ ve anlamlılık düzeyleri yüksek olan bu modeller yardımıyla belirtilen kaplama tiplerindeki kalıcı deformasyonların tahmini mümkün olacaktır.

Üç eksenli kayma mukavemeti deneyi, Marshall deneyinden daha zor ve zaman alıcı olmasına karşın bitümlü karışımların deformasyon davranışının temsil edilmesinde çok daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Superpave yöntemindeki cihazlara göre çok daha basit ve ucuz olan ÜKM deneyi, şantiyelerde kontrol amaçlı kullanılacak niteliktedir. Özellikle, ülkemizde TMA karışımlarının tasarımında LCPC deneyine alternatif bir performans esaslı deney olarak kullanılabilir.

ÜKM deney sonuçlarından belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açısı kullanılarak hesaplanan oktahedral kayma gerilmesinin kalıcı deformasyon direnci ile iyi bir korelasyon içerisinde olduğu belirlenmiştir. Bitümlü karışımlarda akmanın başlangıcını ifade eden oktahedral kayma gerilmesinin akma tekerlek izi oluşumunun niceliksel bir ifadesi olarak kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, üç farklı karışım tipi kullanılmasına karşın, geliştirilen tahmin modelinde agrega tane dağılımının etkisi ifade edilememiştir. Gelecekteki araştırmalarda, agrega tane dağılımı (tane dağılımı indeksi) ve diğer agrega özellikleri incelenerek, oluşturulan tahmin modelleri geliştirilebilir.

ÜKM deney parametreleri ile gerçek arazi değerleri arasındaki ilişkinin belirlenebileceği kapsamlı bir çalışma sonucunda kayma gerilmesi parametrelerinin alması gereken sınır değerlerini içeren yeni bir şartname önerisi getirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **McGennis R.B., Anderson R.M., Kennedy T.W. and Solaimanian M.**, 1995. Background of superpave asphalt mixture desing and analysis, *National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, FHWA-SA-95-003*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [2] **Dinç, E. ve Yazıcı, A.**, 2000. Superpave bitüm deneyleri ve agrega gradasyonu, *3. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, YTMK, Ankara, 16-17 Kasım, s.161-172.
- [3] **Taşdemir, Y.**, 2003. Bitümlü kaplamaların termal davranışlarının performans testleri ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Christensen, D.W., Bonaquist, R., Anderson D.A. and Gokhale, S.**, 2004. Indirect tension strength as a simple performance test, in *Transportation Research Board Circular, E-C068*, pp. 44-57, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- [5] **Beuving, E.**, 2004. AB'de bitümlü karışımlara ilişkin standardizasyon çalışmaları, *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, YTMK, Ankara, 25-26 Kasım, s. 33-48.
- [6] **Önal, M.A.**, 1998. SMA nedir?, *2. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, YTMK, Ankara, 10-11 Aralık, s. 188-197.
- [7] **Önal, M.A., Orhan, F. ve Demir, Ş.**, 2000. SMA deneme çalışmaları, *3. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, YTMK, Ankara, 16-17 Kasım, s.120-135.
- [8] **Ağar, E., Taşdemir, Y. ve Ergün, M.**, 1998. Stone mastik asfalt kaplamaların incelenmesi, *2. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, YTMK, Ankara, 10-11 Aralık, s.176-187.
- [9] **Tayfur, S.**, 2001. Taş mastik asfalt (SMA) kaplamalar için uygun karışım araştırılması ve bir hizmet ömrü modeli geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [10] **Fwa, T.F., Tan, S.A. and Zhu, L.Y.**, 2001. Reexamining $c-\phi$ concept for asphalt paving mix design, *Journal of Transportation Engineering*, **127**, 67-74.
- [11] **Guler, M.**, 2002. Characterization of hot mixture asphalt shear resistance and correlation with rutting performance, *PhD Thesis*, University of Wisconsin, Madison.
- [12] **Tan, S.A., Low B.H. and Fwa, T.F.**, 1994. Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression, *Journal of Testing and Evaluation*, **22**, 195-203.
- [13] **Umar, F. ve Ağar, E.**, 1985. Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [14] **Uluçaylı, M.**, 2002. Asfalt El Kitabı, İsfalt Yayınları, İstanbul.
- [15] **Luminari, M. and Fidato, A.**, 1998. State of the art report on mix design, *Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design*, **RILEM Report 17**, pp. 69-101, Eds. Francken, L., E & FN Spon, London, UK.
- [16] **Lav, A.H.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İsfalt Yayınları, İstanbul.
- [17] **Barksdale, R.D. and Alba, G.**, 1997. SYN3: Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design, *Georgia Tech. Project Final Report*, **E20-634**, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- [18] **Bonnot, J.**, 1983. Rapport général sur les essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux, *Proceedings of the 3th International RILEM Symposium*, Belgrade, September 12-16.
- [19] **Sousa, J.B, Solaimian, M. and Weissman, S.L.**, 1994. Development and use of the repeated shear test (constant height), *An Optional Superpave Mix Design Toll*, **SHRP-A-698**, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- [20] **The Asphalt Institute**, 1993. Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, Manual Series No.2 (MS-2), Lexington, KY.
- [21] **Cooper, K.E., Brown, S.F., Preston, J.N., and Akeroyd, F.M.L.**, 1991. Development of a practical method for the design of hot mix asphalt, *Transportation Research Record*, **1317**, 42-51.

- [22] **Christensen, D.W.**, 1998. Analysis of creep data from indirect tension test on asphalt concrete, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **67**, 458-492.
- [23] **Goodrich, J.L.**, 1991. Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **60**, 81-121.
- [24] **Uzan, J.**, 1996. Asphalt concrete characterization for pavement performance predictions, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **65**, 573-607.
- [25] **Painter, P.C. and Coleman, M.M.**, 1997. Fundamentals of Polymer Science- An Introductory Text, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA.
- [26] **Atkinson, J.**, 1993. An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations Through Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London.
- [27] **Huang, Y.**, 1993. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey.
- [28] **Mase, G.E.**, 1970. Theory and Problems of Continuum Mechanics, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York.
- [29] **Das, B.M.**, 1997. Advanced Soil Mechanics, Taylor&Francis, Washington, DC.
- [30] **Christensen, W.D. and Bonaquist, R.**, 2002. Use of strength tests for evaluating the rut resistance of asphalt concrete, *Proceedings of Association of Asphalt Paving*, **71**, 692-711.
- [31] **Nevelt, G. and Thanfold, H.**, 1988. Evaluation of the resistance to deformation of different road structures and asphalt mixtures determined in the pavement-rutting tester, *Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **57**, 320-345.
- [32] **Goode, J.F. and Lufsey, A.**, 1962. A new graphical chart for evaluating aggregate gradations, *Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **31**, 176-207.
- [33] **Huber, G.A. and T.S. Shuler**, 1992. Providing sufficient voids space for asphalt cement: relationship of mineral aggregate voids and aggregate gradation, *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1147**, pp. 225-251, ASTM International, Philadelphia.

- [34] **Archilla, A.R. and Samer, M.**, 2001. Development of a pavement rutting model from experimental data, *Journal of Transportation Engineering*, **126**, 291-299.
- [35] **Roque, R., Huang, S. and Ruth, B.E.**, 1997. Maximizing shear resistance of asphalt mixtures by proper selection of asphalt gradation, *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, University of Washington, Seattle, WA, August 10-14 Vol. II, pp. 249-268.
- [36] **Sosnovske, D., Leahy, R.B. and Hicks, R.G.**, 1994. Evaluation of rutting potential of oregon surface mixes, *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, **63**, 258-298.
- [37] **Matthews, J.M. and Monismith, C.L.**, 1992. The Effect of aggregate gradation on the creep response of asphalt mixtures and pavement rutting estimates, *Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1147**, pp. 329-347, Eds. Meininger, R.C., ASTM International, Philadelphia.
- [38] **Huber, G.A. and Heiman, G.H.**, 1987. Effects of asphalt concrete parameters on rutting performance: A field investigation, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **56**, pp. 33-61.
- [39] **Kim, Y.R., Kim, N. and Khosla, N.P.**, 1992. Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete, *Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1147**, pp. 310-247, Eds. Meininger, R.C., ASTM International, Philadelphia.
- [40] **Karakouzian, M., Dunning, M.R., Dunning, R.L. and Stegeman, J.D.**, 1996. Performance of hot mix asphalt using coarse and skip graded and aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **8**, 101-107.
- [41] **Brosseaud, Y., Delorme, J.L. and Hiernaux, R.**, 1993. Use of LPC wheel-tracking rutting tester to select asphalt pavements resistant to rutting, *Transportation Research Record*, **1384**, 59-68.
- [42] **Valkering, C.P., Lancon, D.J.L., Dehilster, E. and Stoker, D.A.**, 1990. Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **59**, 590-609.

- [43] **Stuart, K.D. and Izzo, R.P.**, 1995. Correlation of superpave $|G^*/\sin \delta|$ with rutting susceptibility from laboratory mixture tests, *Transportation Research Record*, **1492**, 176-183.
- [44] **Sybilski, D.**, 1996. Zero-shear viscosity of bituminous binder and its relation to bituminous mixture's rutting resistance, *Transportation Research Record*, **1535**, 15-21.
- [45] **Leahy, R.B., Monismith, C.L. and Lundy, J.R.**, 1995. Performance-based properties of asphalt concrete mixes, *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to Their Performance*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1265**, pp. 37-53, Eds. Huber, G.A. and Decker, D.S., ASTM International, Philadelphia.
- [46] **Sherwood, J.A., Thomas, N.L. and Qi, X.**, 1998. Correlation of superpave $|G^*/\sin \delta|$ with rutting test results from accelerated loading facility, *Transportation Research Record*, **1630**, 53-61.
- [47] **Little, D.N., Buton, J.W. and Youssef, H.**, 1993. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential, *Transportation Research Record*, **1417**, 49-57.
- [48] **Brown, E.R. and Stephen, A.C.**, 1989. A study of in-place rutting of asphalt pavements, *Journal of the Ass. of Asphalt Paving Tech.*, **58**, 1-39.
- [49] **Mallick, R.B., Ahlrich, R. and Brown, E.R.**, 1995. Potential of dynamic creep to predict rutting, *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1265**, pp. 194-212, Eds. Huber, G.A. and Decker, D.S., ASTM International, Philadelphia.
- [50] **Brown, R.E. and Stephen, A.C.**, 1992. A national study of rutting in hot mix asphalt pavements, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **61**, 535-584.
- [51] **Harvey, J. and Monismith, C.L.**, 1993. Effects of laboratory asphalt concrete specimen preparation variables in fatigue and permanent deformation test results using SHRP A-003A proposed testing equipment, *Transportation Research Record*, **1417**, 38-48.
- [52] **Krutz, N.C. and Stroup-Gardiner, M.**, 1990. Relationship between permanent deformation of asphalt concrete and moisture sensitivity, *Transportation Research Record*, **1259**, 169-177.

- [53] **Brown, R.E., Kandhal, P.S. and Zhang, J.**, 2001. Performance testing for hot mix asphalt, *NCAT Report*, **01-05**, National Center for Asphalt Technology, Alabama.
- [54] **Brown, E.R. and Cross, S.**, 1989. A study of in-place rutting of asphalt pavement, *NCAT Report*, **89-2**, National Center for Asphalt Technology, Alabama.
- [55] **Tseng, K.H. and Lytton, R.L.**, 1986. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials, *Implication of Aggregate in the Design, Construction and Performance of Flexible Pavements*, ASTM Spec. Tech. Publ., **1016**, pp. 154-172, Eds. Schreuders, H.G. and Marek, C.R., ASTM International, Philadelphia.
- [56] **Van de Loo, P.J.**, 1978. The creep test: A key tool in asphalt mix design and in the prediction of pavement rutting, *Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **47**, 522-554.
- [57] **Shell International Petroleum Company Ltd.**, 1978. Shell Pavement Design Manual-Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, Shell International Petroleum Company Ltd., London.
- [58] **Finn, F.N., Monismith, C.L. and Markevich, N.J.**, 1983. Pavement performance and asphalt concrete mix design, *Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **52**, 121-144.
- [59] **Mahboub, K.**, 1988. Rutting Characterization in an improved asphalt concrete mix design procedure for the state of texas, *PhD Thesis*, Texas A&M University, Texas.
- [60] **Asphalt Institute**, 1982. Research and development of the Asphalt Institute's thickness design manual (MS-1), *Research Report*, **82-2**, Asphalt Institute, Lexington, KY.
- [61] **Wang, J.N., Yang, C.K. and Luo, T.Y.**, 2002. Mechanistic analysis of asphalt pavements, using superpave shear tester and hamburg wheel-tracking device, *Transportation Research Record*, **1767**, 102-110.
- [62] **Sousa, J.B.**, 1995. Asphalt-aggregate mix design using the repetitive simple shear test (constant height), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **64**, 298-345.
- [63] **Kandhal, P.S. and Mallick, R.B.**, 1999. Evaluation of asphalt pavement analyzer for HMA mix design, *NCAT Report*, **99-4**, National Center for Asphalt Technology, Alabama.

- [64] **Shami, H.I., Lai, J.S., D'Angelo, J.A. and Harman, T.P.,** 1997. Development of temperature-effect model for predicting rutting of asphalt mixtures using Georgia loaded wheel tester, *Transportation Research Record*, **1590**, 17-22.
- [65] **Zahw, M., El Samny, K. and Abd El Halim, A.O.,** 1996. Improving the rutting resistance of asphalt mixes, *Proceeding of the Canadian Technical Asphalt Association*, **41**, 282-293.
- [66] **Leahy, R.,** 1989. Permanent deformation characterization of asphalt mixtures, *PhD Thesis*, University of Maryland, College Park, MD.
- [67] **Ayres, M.,** 1997. Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis, *PhD Thesis*, University of Maryland, College Park, MD.
- [68] **Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. and Von Quintus, H.,** 2002. Simple performance test for superpave mix design, *NCHRP Report*, **465**, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [69] **Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L.,** 2004. Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes, *Journal of Transportation Engineering*, **130**, 486-494.
- [70] **Woods, K.B., Berry, D.S. and Goetz W.H.,** 1960. Highway Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York.
- [71] **Endersby, V.A.,** 1951. The history and theory of triaxial testing and the preparation of realistic test specimens-a report of the triaxial institute, *Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixtures*, ASTM Spec. Tech. Publ., **106**, pp. 5-24, American Society of Testing and Materials, Philadelphia.
- [72] **Hveem, E.D. and Davis, H.E.,** 1950. Some concepts concerning triaxial compression testing of asphaltic paving mixtures and subgrade materials, *Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixtures*, ASTM Spec. Tech. Publ., **106**, pp. 25-54, American Society of Testing and Materials, Philadelphia.
- [73] **Smith, V.R.,** 1951. Application of the triaxial test to bituminous mixtures california research corporation method, *Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixtures*, ASTM Spec. Tech. Publ., **106**, pp. 55-78, American Society of Testing and Materials, Philadelphia.

- [74] **Mcleod, N.W.**, 1950. A rational approach to the design of bituminous paving mixtures. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **19**, 83-187.
- [75] **Oppenlander, J.C. and Goetz, W.H.**, 1958. Triaxial testing of bituminous mixtures at high confining pressures, *Proceeding of Highway Research Board*, **37**, 201-218.
- [76] **Nijboer, L.W.**, 1948. Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets, Elsevier Science, New York.
- [77] **Akili, W.**, 1975. Strength Behavior of Soil-Asphalt Mixtures in Compression, *The Journal of the Institution of Highway Engineers*, **22**, 9-13.
- [78] **Goetz, W.H. and Chen, C.C.**, 1950. Vacuum triaxial technique applied to bituminous aggregate mixtures, *Proceedings of Association of Asphalt Technologists*, **19**, 55-81.
- [79] **Hewitt, W.L.**, 1960. Analysis of stresses in flexible pavements and development of a structural design procedure, *Highway Research Board Bulletin*, **269**, 66-74
- [80] **Monismith, C.L. and Vallerga, B.A.**, 1956. Relationship between density and stability of asphaltic paving mixtures, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **25**, 88-108.
- [81] **Low B.H., Tan, S.A. and Fwa, T.F.**, 1993. Analysis of marshall test behavior with triaxial test determined material properties, *Journal of Testing and Evaluation*, **21**, 192-198.
- [82] **Fwa, T.F., Tan, S.A. and Low B.H.**, 1998. Relating triaxial test properties of asphalt mixtures to mix parameters determined by Marshall stability test, *Journal of Testing and Evaluation*, **25**, 471-479.
- [83] **Fwa, T.F., Low B.H. and Tan, S.A.**, 1993. Compaction of asphalt mixtures for laboratory testing: evaluation based on density profile, *Journal of Testing and Evaluation*, **21**, 414-421.
- [84] **Pellinen, T.K., Song, J. and Xiao S.**, 2004. Characterization of hot mix asphalt with varying air voids content using triaxial shear strength test, *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA '04)*, Sun City, South Africa, September 12-16.
- [85] **Huang, E.Y.**, 1970. A study of strength characteristics of asphalt-aggregate mixtures as affected by the geometric characteristics and gradation of aggregate, *Proc., Ass. of Asphalt Paving Tech.*, **39**, 98-133.

- [86] **Kaloush, K., Witzak, M., Way, G., Zborowski, A., Abojaradeh, M. and Sotil, A.,** 2002. Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests, Arizona Department of Transportation Final Report, Arizona.
- [87] **Stiady, J.L.,** 2000. Validation of SHRP asphalt mixture specifications using accelerated testing, *PhD Thesis*, Purdue University, West Lafayette.
- [88] **Pellinen, T.K.,** 2001. Investigation of the use of dynamic modul as an indicator of hot-mix asphalt performance, *PhD Thesis*, Arizona State University, Arizona.
- [89] **McLeod, N.W.,** 1952. Rational design of bituminous paving mixtures with curved mohr envelopes, *Proceeding of the Association of Asphalt Technologists*, **21**, 349-437.
- [90] **Carpenter, S.H. and Freeman, T.J.,** 1986. Characterizing permanent deformation in asphalt concrete placed over portland cement concrete pavements, *Transportation Research Record*, **1070**, 30-41.
- [91] **McLaughlin, J.F. and Goetz, W.H.,** 1952. Comparison of unconfined and Marshall test results, *Proceeding of the Association of Asphalt Technologists*, **21**, 203-236.
- [92] **Karayolları Genel Müdürlüğü,** 2006. Karayolu Teknik Şartnamesi, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [93] **ASTM D 1559,** 1989. Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus, *ASTM Standart Specifications*, Pennsylvania.
- [94] **ASTM D 1074,** 2002. Standard test method for compressive strength of bituminous mixtures, *ASTM Standart Specifications*, Pennsylvania.

EKLER

EK A: Schellenberger Bitüm Süzülme Deney Yöntemi

EK B: ÜKM Deney Sonuçlarının Değerlendirme Aşamaları

EK C: Seçilen Kaplama Tipleri için Yapılan Marshall Tasarım Sonuçları

EK D: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Numunelerinin Hacimsel Analizi

EK E: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Numunelerinin Hacimsel Analizi

EK F: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Sünme Rijitliği Grafikleri

EK A: Schellenberger Bitüm Süzülme Deney Yöntemi

TMA karışımların taşınması ve serilmesi sırasında, bitümün agregalar arasından süzülerek belli bölgelerde birikmesini önlemek amacıyla içerisine katılan optimum fiber miktarının belirlemek için uygulanan bir deneydir. Karayolu Teknik Şartnamesi Kısım 408 Ek-A'da belirtilen bu deney metodunda yaklaşık olarak çalışılacak agrega agregata tane dağılımında 3000 g bitümlü karışım hazırlanması öngörülür. Karışım malzemeleri ve karıştırma gereçleri yaklaşık 150 °C sıcaklıktaki fırında ısıtılarak, karışım 30 saniye kuru olarak karıştırılır ve 205 g bitümlü bağlayıcı ilave edilerek 3 dakika karıştırma süresinden sonra 800 ml'lik beherlere boşaltılmadan önce yaklaşık 90 saniye beklenir. 1000 g'lık miktarlarda boş tartımları alınan beherler içerisine boşaltılır ve 170 °C sıcaklıktaki fırında 1 saat süreyle bekletilir. Sürenin sonunda etüvden çıkartılan karışım beheri sarsmadan boşaltılır ve beher tekrar 0,1 g hassasiyetinde tartılır ve ağırlık kaybı aşağıdaki gibi yüzde (%) olarak hesaplanır.

$$B_s = \frac{B - A}{C} \cdot 100$$

B_s : Süzülen bitüm yüzdesi, %

A: Beherin boş ağırlığı, g

B: Bitüm boşaltıldıktan sonraki beher ağırlığı, g

C: Bitümlü karışımın ağırlığı, g

Tablo A.1: TMA Tip-1 ve TMA Tip-2 için Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi

Bitüm Tipi	İzmit B 50-70			Polimer Modifiye Bitüm		
Selülozik fiber yüzdesi, %	0,9			0,5		
Deney sayısı	1	2	3	1	2	3
Beher ağırlığı(A), g	273,0	265,8	271,9	273,0	265,8	271,9
Bitüm bulaşmış beher ağırlığı (B), g	273,6	266,3	272,4	273,3	266,0	272,2
Bitüm karışım ağırlığı (C), g	1000,9	1000,3	957,5	1012,7	1009,5	965,0
Bitüm süzülme yüzdesi (B_s), %	0,060	0,050	0,05	0,03	0,02	0,03
Ortalama Bitüm süzülme yüzdeleri, %	0,05			0,03		

EK B: ÜKM Deney Sonuçlarının Değerlendirme Aşamaları

Tablo B.1: ÜKM Deney Verilerinden Deviatör Gerilmelerin Hesaplanması

Numunenin Tanımı		5				
Deney Sıcaklığı, °C	40	Numunenin Bitüm Yüzdesi, %	5,5			
Hücre Basıncı, kPa	70	Pratik Hacim Özgül Ağırlığı	2,420			
Yükleme Hızı, mm/dk	1,27	Numune Yüksekliği, mm	150,7			
Def. Saatinin Hassaslığı, mm	0,01	Başlangıç Enkesit Alanı, mm ²	8107,32			
Yük Halkası Sabiti	0,03497	Başlangıç Hacmi, mm ³	1221773			
Yük Halkası Okuması	Basınç Kuvveti, P (kN)	Def. Saati Okuması, L (1/100 mm)	Boy Kısalması, ΔL	Birim Boy Kısalması, ε	Düzl. Enkesit Alanı, A _c (mm ²)	Deviatör Gerilme, Δσ (kPa)
24	0,844	20	0,20	0,0013	8118,1	104,00
43	1,504	40	0,40	0,0027	8128,9	185,00
63	2,214	60	0,60	0,0040	8139,7	272,00
86	3,008	80	0,80	0,0053	8150,6	369,00
115	4,024	100	1,00	0,0066	8161,5	493,00
144	5,042	120	1,20	0,0080	8172,4	617,00
174	6,072	140	1,40	0,0093	8183,3	742,00
208	7,260	160	1,60	0,0106	8194,3	886,00
243	8,509	180	1,80	0,0119	8205,3	1037,00
282	9,843	200	2,00	0,0133	8216,4	1198,00
319	11,156	220	2,20	0,0146	8227,4	1356,00
356	12,440	240	2,40	0,0159	8238,5	1510,00
384	13,430	260	2,60	0,0173	8249,6	1628,00
408	14,250	280	2,80	0,0186	8260,8	1725,00
423	14,799	300	3,00	0,0199	8272,0	1789,00
432	15,092	320	3,20	0,0212	8283,2	1822,00
429	15,005	340	3,40	0,0226	8294,5	1809,00
419	14,660	360	3,60	0,0239	8305,7	1765,00
406	14,181	380	3,80	0,0252	8317,0	1705,00
392	13,709	400	4,00	0,0265	8328,4	1646,00
382	13,344	420	4,20	0,0279	8339,7	1600,00
370	12,936	440	4,40	0,0292	8351,1	1549,00
359	12,544	460	4,60	0,0305	8362,6	1500,00
350	12,226	480	4,80	0,0319	8374,0	1460,00
341	11,907	500	5,00	0,0332	8385,5	1420,00
333	11,655	520	5,20	0,0345	8397,1	1388,00
327	11,419	540	5,40	0,0358	8408,6	1358,00
318	11,132	560	5,60	0,0372	8420,2	1322,00
312	10,902	580	5,80	0,0385	8431,8	1293,00
307	10,732	600	6,00	0,0398	8443,5	1271,00
301	10,535	620	6,20	0,0411	8455,2	1246,00
297	10,397	640	6,40	0,0425	8466,9	1228,00
295	10,310	660	6,60	0,0438	8478,6	1216,00
291	10,189	680	6,80	0,0451	8490,4	1200,00
289	10,092	700	7,00	0,0464	8502,2	1187,00
286	9,987	720	7,20	0,0478	8514,1	1173,00
282	9,873	740	7,40	0,0491	8526,0	1158,00
279	9,767	760	7,60	0,0504	8537,9	1144,00
277	9,670	780	7,80	0,0518	8549,8	1131,00
274	9,572	800	8,00	0,0531	8561,8	1118,00
271	9,466	820	8,20	0,0544	8573,8	1104,00
267	9,350	840	8,40	0,0557	8585,9	1089,00
264	9,234	860	8,60	0,0571	8598,0	1074,00
262	9,153	880	8,80	0,0584	8610,1	1063,00
259	9,045	900	9,00	0,0597	8622,3	1049,00
256	8,963	920	9,20	0,0610	8634,4	1038,00
253	8,846	940	9,40	0,0624	8646,7	1023,00
251	8,763	960	9,60	0,0637	8658,9	1012,00
250	8,758	980	9,80	0,0650	8671,2	1010,00
249	8,710	1000	10,00	0,0664	8683,5	1003,00

Tablo B.1: ÜKM Deney Verilerinden Deviator Gerilmelerin Hesaplanması (Devamı)

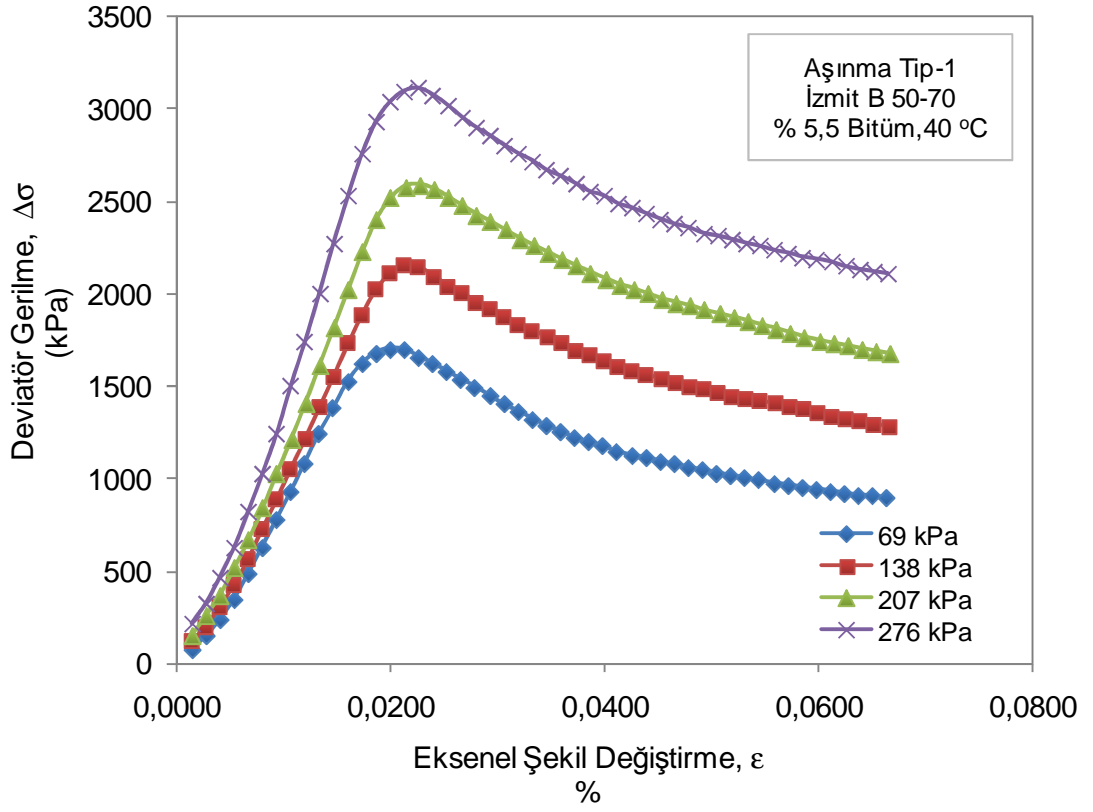
Numunenin Tanımı		6				
Deney Sıcaklığı, °C	40	Numunenin Bitüm Yüzdesi, %	5,5			
Hücre Basıncı, kPa	140	Pratik Hacim Özgül Ağırlığı	2,417			
Yükleme Hızı, mm/dak	1,27	Numune Yüksekliği, mm	150,4			
Def. Saatinin Hassaslığı, mm	0,01	Başlangıç Enkesit Alanı, mm ²	8107,32			
Yük Halkası Sabiti	0,03497	Başlangıç Hacmi, mm ³	1219341			
Yük Halkası Okuması	Basınç Kuvveti, P (kN)	Def.Saati Okuması, ℓ (1/100 mm)	Boy Kısalması, Δℓ	Birim Boy Kısalması, ε	Düzl.Enkesit Alanı, A _c (mm ²)	Deviator Gerilme, Δσ (kPa)
35	1,22	20	0,20	0,0013	8118,1	150,75
52	1,81	40	0,40	0,0027	8128,9	223,00
74	2,60	60	0,60	0,0040	8139,8	320,00
101	3,52	80	0,80	0,0053	8150,7	432,00
131	4,59	100	1,00	0,0066	8161,6	562,00
167	5,84	120	1,20	0,0080	8172,5	715,00
203	7,10	140	1,40	0,0093	8183,5	868,00
244	8,51	160	1,60	0,0106	8194,5	1039,00
286	9,99	180	1,80	0,0120	8205,5	1218,00
328	11,47	200	2,00	0,0133	8216,6	1396,00
368	12,87	220	2,20	0,0146	8227,7	1564,00
411	14,36	240	2,40	0,0160	8238,8	1743,00
449	15,71	260	2,60	0,0173	8249,9	1904,00
487	17,04	280	2,80	0,0186	8261,1	2063,00
514	17,98	300	3,00	0,0199	8272,3	2174,00
533	18,65	320	3,20	0,0213	8283,6	2251,00
540	18,87	340	3,40	0,0226	8294,8	2275,00
538	18,81	360	3,60	0,0239	8306,1	2264,00
525	18,36	380	3,80	0,0253	8317,5	2208,00
515	18,02	400	4,00	0,0266	8328,8	2163,00
503	17,59	420	4,20	0,0279	8340,2	2109,00
493	17,24	440	4,40	0,0293	8351,6	2064,00
481	16,80	460	4,60	0,0306	8363,1	2009,00
472	16,51	480	4,80	0,0319	8374,6	1971,00
464	16,22	500	5,00	0,0332	8386,1	1934,00
454	15,89	520	5,20	0,0346	8397,7	1892,00
447	15,62	540	5,40	0,0359	8409,2	1858,00
440	15,40	560	5,60	0,0372	8420,9	1829,00
433	15,14	580	5,80	0,0386	8432,5	1795,00
428	14,98	600	6,00	0,0399	8444,2	1774,00
423	14,79	620	6,20	0,0412	8455,9	1749,00
418	14,60	640	6,40	0,0426	8467,6	1724,00
414	14,47	660	6,60	0,0439	8479,4	1707,00
409	14,32	680	6,80	0,0452	8491,2	1686,00
406	14,19	700	7,00	0,0465	8503,1	1669,00
404	14,11	720	7,20	0,0479	8515,0	1657,00
399	13,95	740	7,40	0,0492	8526,9	1636,00
396	13,86	760	7,60	0,0505	8538,8	1623,00
394	13,78	780	7,80	0,0519	8550,8	1611,00
390	13,65	800	8,00	0,0532	8562,8	1594,00
388	13,56	820	8,20	0,0545	8574,8	1581,00
385	13,47	840	8,40	0,0559	8586,9	1569,00
384	13,41	860	8,60	0,0572	8599,0	1560,00
380	13,30	880	8,80	0,0585	8611,2	1544,00
379	13,24	900	9,00	0,0598	8623,3	1535,00
376	13,15	920	9,20	0,0612	8635,6	1523,00
373	13,06	940	9,40	0,0625	8647,8	1510,00
372	12,99	960	9,60	0,0638	8660,1	1500,00
368	12,88	980	9,80	0,0652	8672,4	1485,00
367	12,83	1000	10,00	0,0665	8684,8	1477,00

Tablo B.1: ÜKM Deney Verilerinden Deviatör Gerilmelerin Hesaplanması (Devamı)

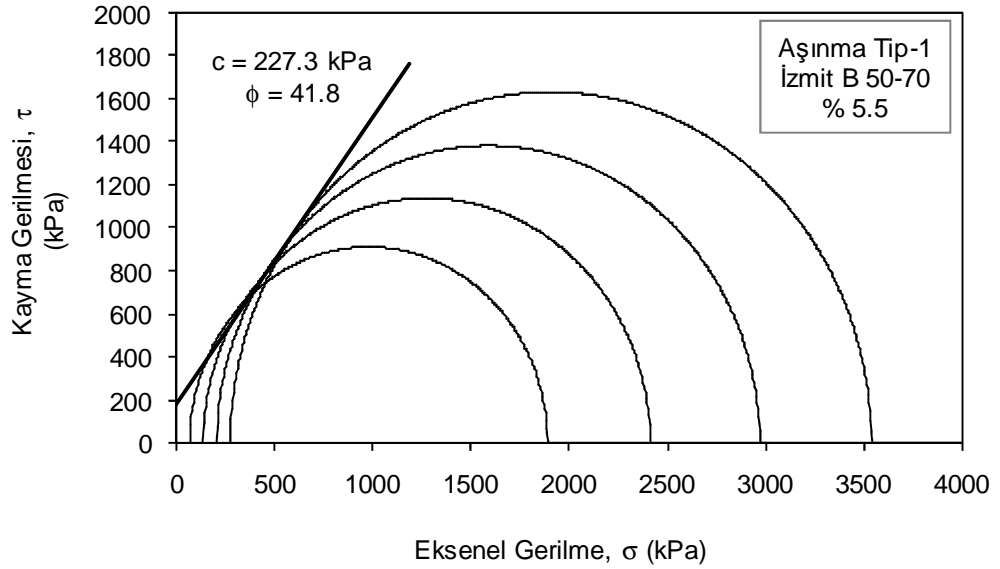
Numunenin Tanımı		7				
Deney Sıcaklığı, °C		40	Numunenin Bitüm Yüzdesi, %			5,5
Hücre Basıncı, kPa		210	Pratik Hacim Özgül Ağırlığı			2,416
Yükleme Hızı, mm/dak		1,27	Numune Yüksekliği, mm			150,8
Def. Saatinin Hassaslığı, mm		0,01	Başlangıç Enkesit Alanı, mm ²			8107,32
Yük Halkası Sabiti		0,03497	Başlangıç Hacmi, mm ³			1222584
Yük Halkası Okuması	Basınç Kuvveti, P (kN)	Def.Saati Okuması, ℓ (1/100 mm)	Boy Kısalması, $\Delta\ell$	Birim Boy Kısalması, ϵ	Düzl. Enkesit Alanı, A_c (mm ²)	Deviatör Gerilme, $\Delta\sigma$ (kPa)
42	1,45	20	0,20	0,0013	8118,1	179,00
62	2,18	40	0,40	0,0027	8128,9	268,00
88	3,06	60	0,60	0,0040	8139,7	376,00
122	4,28	80	0,80	0,0053	8150,6	525,00
156	5,47	100	1,00	0,0066	8161,4	670,00
194	6,78	120	1,20	0,0080	8172,4	830,00
234	8,18	140	1,40	0,0093	8183,3	1000,00
277	9,67	160	1,60	0,0106	8194,3	1180,00
321	11,23	180	1,80	0,0119	8205,3	1369,00
373	13,05	200	2,00	0,0133	8216,3	1588,00
422	14,74	220	2,20	0,0146	8227,3	1792,00
470	16,44	240	2,40	0,0159	8238,4	1996,00
522	18,26	260	2,60	0,0172	8249,6	2214,00
570	19,92	280	2,80	0,0186	8260,7	2411,00
613	21,45	300	3,00	0,0199	8271,9	2593,00
641	22,41	320	3,20	0,0212	8283,1	2706,00
654	22,87	340	3,40	0,0225	8294,3	2757,00
657	22,96	360	3,60	0,0239	8305,6	2764,00
652	22,80	380	3,80	0,0252	8316,9	2742,00
643	22,49	400	4,00	0,0265	8328,2	2700,00
631	22,05	420	4,20	0,0279	8339,6	2644,00
620	21,69	440	4,40	0,0292	8351,0	2597,00
611	21,35	460	4,60	0,0305	8362,4	2553,00
600	20,98	480	4,80	0,0318	8373,9	2506,00
589	20,59	500	5,00	0,0332	8385,3	2455,00
578	20,20	520	5,20	0,0345	8396,9	2406,00
569	19,89	540	5,40	0,0358	8408,4	2366,00
559	19,53	560	5,60	0,0371	8420,0	2320,00
552	19,31	580	5,80	0,0385	8431,6	2290,00
544	19,02	600	6,00	0,0398	8443,3	2252,80
538	18,81	620	6,20	0,0411	8454,9	2224,87
534	18,67	640	6,40	0,0424	8466,6	2205,28
529	18,50	660	6,60	0,0438	8478,4	2181,60
524	18,32	680	6,80	0,0451	8490,2	2157,99
520	18,18	700	7,00	0,0464	8502,0	2138,54
516	18,04	720	7,20	0,0477	8513,8	2119,14
513	17,94	740	7,40	0,0491	8525,7	2103,88
509	17,80	760	7,60	0,0504	8537,6	2084,57
505	17,66	780	7,80	0,0517	8549,5	2065,30
502	17,55	800	8,00	0,0531	8561,5	2050,16
499	17,45	820	8,20	0,0544	8573,5	2035,05
496	17,34	840	8,40	0,0557	8585,6	2019,98
493	17,24	860	8,60	0,0570	8597,6	2004,94
491	17,17	880	8,80	0,0584	8609,7	1994,00
488	17,06	900	9,00	0,0597	8621,9	1979,02
486	16,99	920	9,20	0,0610	8634,1	1968,13
484	16,92	940	9,40	0,0623	8646,3	1957,27
481	16,82	960	9,60	0,0637	8658,5	1942,38
479	16,75	980	9,80	0,0650	8670,8	1931,57
476	16,64	1000	10,00	0,0663	8683,1	1916,75

Tablo B.1: ÜKM Deney Verilerinden Deviatör Gerilmelerin Hesaplanması (Devamı)

Numunenin Tanımı		8				
Deney Sıcaklığı, °C	40	Numunenin Bitüm Yüzdesi, %	5,5			
Hücre Basıncı, kPa	280	Pratik Hacim Özgül Ağırlığı	2,421			
Yükleme Hızı, mm/dak	1,27	Numune Yüksekliği, mm	150,5			
Def. Saatinin Hassaslığı, mm	0,01	Başlangıç Enkesit Alanı, mm ²	8107,32			
Yük Halkası Sabiti	0,03497	Başlangıç Hacmi, mm ³	1220152			
Yük Halkası Okuması	Basınç Kuvveti, P (kN)	Def. Saati Okuması, ℓ (1/100 mm)	Boy Kısalması, $\Delta\ell$	Birim Boy Kısalması, ϵ	Düzl. Enkesit Alanı, A_c (mm ²)	Deviatör Gerilme, $\Delta\sigma$ (kPa)
53	1,84	20	0,20	0,0013	8118,1	227,00
84	2,93	40	0,40	0,0027	8128,9	361,00
115	4,02	60	0,60	0,0040	8139,8	494,00
150	5,24	80	0,80	0,0053	8150,6	643,00
190	6,65	100	1,00	0,0066	8161,5	815,00
232	8,12	120	1,20	0,0080	8172,5	994,00
277	9,69	140	1,40	0,0093	8183,4	1184,00
326	11,40	160	1,60	0,0106	8194,4	1391,00
377	13,18	180	1,80	0,0120	8205,5	1606,00
435	15,20	200	2,00	0,0133	8216,5	1850,00
494	17,26	220	2,20	0,0146	8227,6	2098,00
553	19,32	240	2,40	0,0159	8238,7	2345,00
611	21,36	260	2,60	0,0173	8249,8	2589,00
658	22,99	280	2,80	0,0186	8261,0	2783,00
702	24,55	300	3,00	0,0199	8272,2	2968,00
736	25,74	320	3,20	0,0213	8283,4	3107,00
761	26,62	340	3,40	0,0226	8294,7	3209,00
773	27,04	360	3,60	0,0239	8306,0	3256,00
776	27,14	380	3,80	0,0252	8317,3	3263,00
771	26,97	400	4,00	0,0266	8328,7	3238,00
762	26,64	420	4,20	0,0279	8340,1	3194,00
752	26,28	440	4,40	0,0292	8351,5	3147,00
741	25,93	460	4,60	0,0306	8362,9	3100,00
731	25,56	480	4,80	0,0319	8374,4	3052,00
721	25,20	500	5,00	0,0332	8385,9	3005,00
708	24,74	520	5,20	0,0346	8397,5	2946,00
696	24,34	540	5,40	0,0359	8409,0	2895,00
687	24,02	560	5,60	0,0372	8420,6	2852,00
676	23,64	580	5,80	0,0385	8432,3	2804,00
667	23,34	600	6,00	0,0399	8444,0	2764,00
657	22,97	620	6,20	0,0412	8455,7	2717,00
648	22,67	640	6,40	0,0425	8467,4	2677,00
642	22,45	660	6,60	0,0439	8479,2	2648,00
638	22,30	680	6,80	0,0452	8491,0	2626,00
633	22,14	700	7,00	0,0465	8502,8	2604,00
627	21,93	720	7,20	0,0478	8514,7	2575,00
624	21,80	740	7,40	0,0492	8526,6	2557,00
620	21,68	760	7,60	0,0505	8538,5	2539,00
616	21,55	780	7,80	0,0518	8550,5	2520,00
613	21,42	800	8,00	0,0532	8562,5	2502,00
609	21,30	820	8,20	0,0545	8574,5	2484,00
606	21,17	840	8,40	0,0558	8586,6	2466,00
604	21,11	860	8,60	0,0571	8598,7	2455,00
600	20,98	880	8,80	0,0585	8610,8	2437,00
598	20,92	900	9,00	0,0598	8623,0	2426,00
595	20,82	920	9,20	0,0611	8635,2	2411,00
595	20,79	940	9,40	0,0625	8647,4	2404,00
593	20,72	960	9,60	0,0638	8659,7	2393,00
590	20,62	980	9,80	0,0651	8672,0	2378,00
589	20,59	1000	10,00	0,0664	8684,4	2371,00



Şekil B.1: Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri



Şekil B.2: Mohr Daireleri ve Kırılma Zarfı

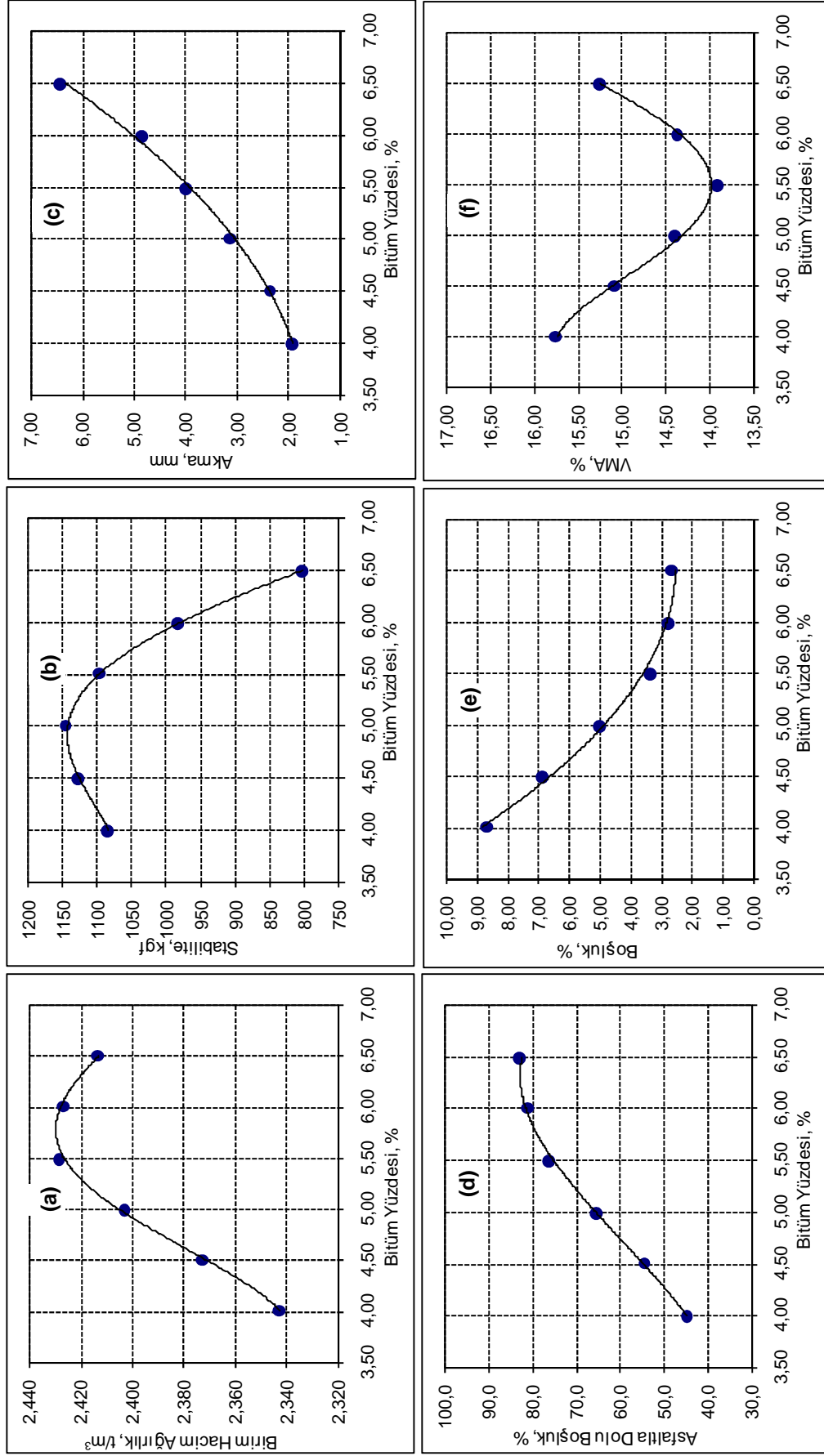
EK C: Seçilen Kaplama Tipleri için Yapılan Marshall Tasarım Sonuçları

Tablo C.1: Aşınma Tip-1 için Marshall Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları

Biriket No	Bitüm		Sıcaklık °C	Biriket Yükseklikleri, mm				Havadaki Ağırlık, g	Suda Ağırlık, g	Doy. Yüz. K. Ağı., g	Hacim cm ³	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk, % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	W _a , %	Wa, g		1	2	3	Ort.													
1	4.00	46,4	135	63,5	63,5	63,7	63,6	1176,6	682,6	1184,2	501,6	2,346				2,08	1112	0,998	1110	
2	4.00	46,4	136	63,2	63,2	63,4	63,3	1193,4	696,1	1196,5	500,4	2,385				3,00	1134	1,006	1141	
3	4.00	46,4	128	63,0	63,1	63,1	63,1	1186,3	686,2	1193,6	507,4	2,338				2,36	1070	1,011	1082	
4	4.00	46,4	130	64,6	64,7	65,0	64,8	1193,4	691,7	1200,7	509,0	2,345				1,30	1099	0,968	1064	
5	4.00	46,4	124	63,7	63,8	63,9	63,8	1183,6	682,9	1191,5	508,6	2,327				2,89	1044	0,993	1036	
											2,343	2,565	8,67	15,74	44,9	1,91				1085
6	4.50	52,2	126	63,4	63,3	63,5	63,4	1195,2	694,4	1198,1	503,7	2,373				2,22	1117	1,003	1120	
7	4.50	52,2	125	62,2	62,4	62,4	62,3	1167,6	679,4	1170,5	491,1	2,378				2,36	1124	1,031	1159	
8	4.50	52,2	130	62,5	62,7	62,8	62,7	1204,7	705,0	1205,9	500,9	2,405				3,32	1243	1,021	1269	
9	4.50	52,2	136	63,6	63,8	63,9	63,8	1203,2	697,6	1205,0	507,4	2,371				2,68	1152	0,993	1144	
10	4.50	52,2	136	63,2	63,2	63,5	63,3	1197,2	693,3	1198,7	505,4	2,369				2,24	1078	1,005	1083	
											2,373	2,547	6,85	15,08	54,6	2,37				1087
11	5.00	58,0	134	62,6	62,7	62,8	62,7	1202,5	705,5	1202,8	497,3	2,418				2,49	1174	1,020	1197	
12	5.00	58,0	135	63,1	63,2	63,4	63,2	1207,1	705,2	1207,7	502,5	2,402				3,20	1197	1,007	1205	
13	5.00	58,0	124	61,8	61,9	62,0	61,9	1176,7	688,7	1177,4	488,7	2,408				3,37	1086	1,040	1129	
14	5.00	58,0	137	63,1	63,3	63,4	63,3	1206,0	704,7	1206,5	501,8	2,403				3,09	1165	1,006	1172	
15	5.00	58,0	137	63,1	63,2	63,2	63,2	1207,2	704,6	1207,7	503,1	2,400				2,84	1074	1,008	1083	
											2,403	2,529	4,99	14,39	65,4	3,12				1147
16	5.50	63,8	134	62,5	62,6	62,7	62,6	1211,8	715,6	1212,1	496,5	2,441				3,87	1029	1,023	1052	
17	5.50	63,8	138	62,3	62,5	62,7	62,5	1214,4	715,1	1214,8	499,7	2,430				4,16	1100	1,025	1128	
18	5.50	63,8	137	62,6	62,7	62,7	62,7	1211,5	711,5	1211,7	500,2	2,422				3,37	1149	1,021	1173	
19	5.50	63,8	135	62,1	62,2	62,4	62,2	1205,9	709,3	1206,1	496,8	2,427				4,68	1026	1,032	1058	
20	5.50	63,8	133	62,8	62,8	63,0	62,9	1215,1	713,6	1215,3	501,7	2,422				3,83	1055	1,016	1072	
											2,428	2,512	3,33	13,90	76,1	3,98				1097
21	6.00	69,6	137	62,0	62,1	62,3	62,1	1203,7	707,5	1204,0	496,5	2,424				5,78	912	1,034	943	
22	6.00	69,6	135	61,6	61,7	61,7	61,7	1194,7	702,4	1195,1	492,7	2,425				4,74	934	1,046	977	
23	6.00	69,6	138	63,2	63,3	63,2	63,2	1227,6	722,5	1228,0	505,5	2,428				5,34	850	1,007	856	
24	6.00	72,0	138	62,4	62,4	62,6	62,5	1214,6	714,5	1214,7	500,2	2,428				4,17	963	1,026	988	
25	6.00	72,0	136	62,1	62,2	62,4	62,2	1205,2	708,8	1205,5	496,7	2,426				4,09	1114	1,032	1149	
											2,426	2,495	2,75	14,38	80,9	4,82				983

Tablo C.1: Aşınma Tip-1 için Marshall Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları (Devamı)

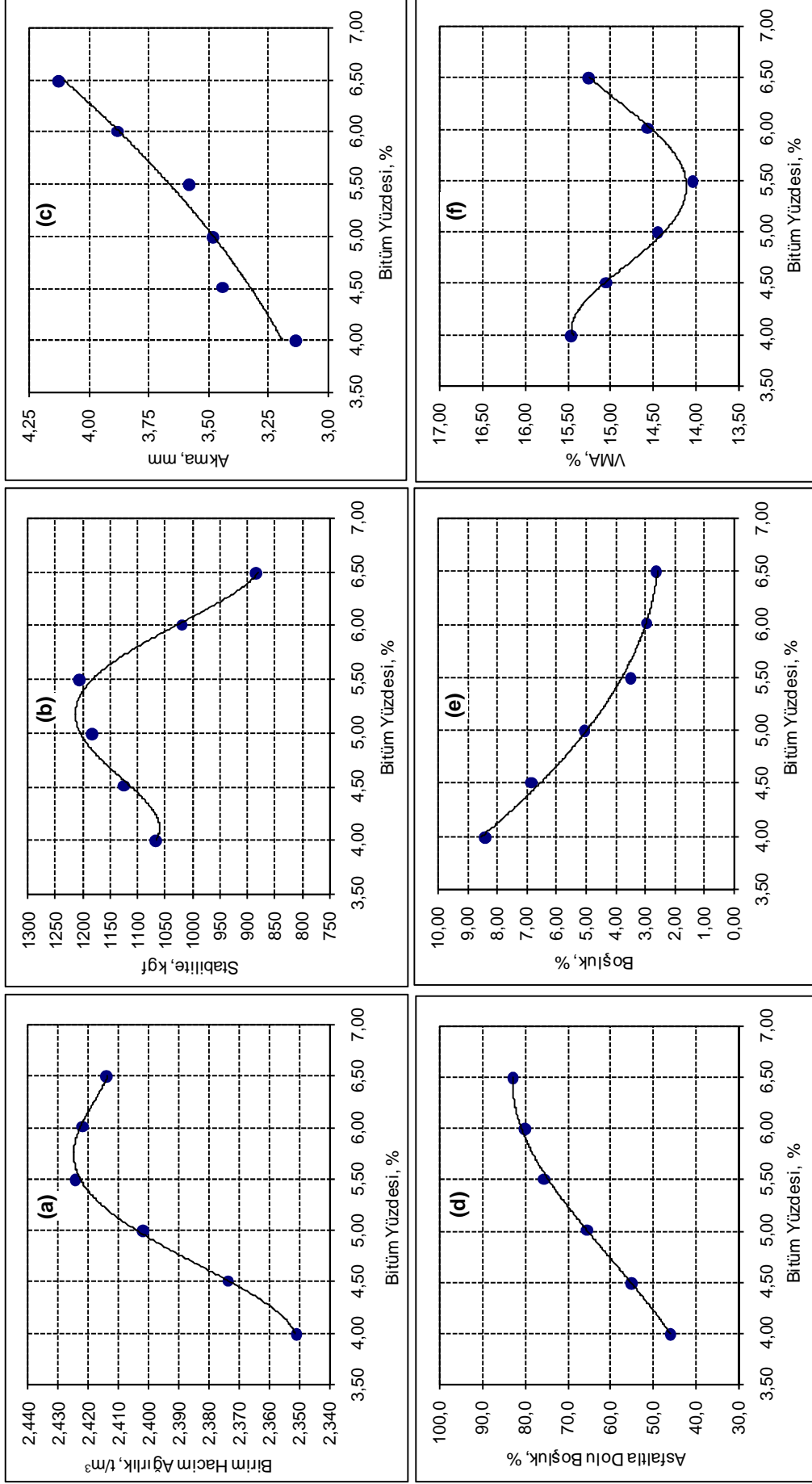
Biriket No	Bitüm		Sıcaklık °C	Biriket Yükseklikleri, mm				Havada Ağırlık, g A	Suda Ağırlık, g C	Doy. Yüz. K. Ağ., g B	Hacim cm ³ V	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³ D _p	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk, % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)	
	W _a , %	W _a , g		1	2	3	Ort.														
26	6,50	75,4	137	61,9	62,2	62,3	62,1	1196,1	701,3	1196,4	495,1	2,416				6,28	689	1,034	713		
27	6,50	75,4	136	62,8	62,6	62,7	62,7	1210,5	708,9	1210,7	501,8	2,412				7,28	819	1,020	835		
28	6,50	75,4	137	63,1	63,3	63,5	63,3	1214,3	710,0	1214,5	504,5	2,407				7,62	729	1,005	733		
29	6,50	78,0	138	62,9	63,0	63,2	63,0	1220,5	715,3	1220,6	505,3	2,415				5,57	835	1,012	845		
30	6,50	78,0	138	62,4	62,5	62,5	62,5	1208,2	708,1	1208,4	500,3	2,415				5,29	868	1,026	890		
												2,479	2,64	15,25	82,7	6,41					803



Şekil C.1: Aşınma Tip-1 için Marshall Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Grafikleri: (a) Birim Hacim Ağırlık (b) Stabilite (c) Akma (d) Asfaltla Dolu Boşluk (e) Boşluk (f) VMA

Tablo C.2: Aşınma Tip-1 için Statik Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları

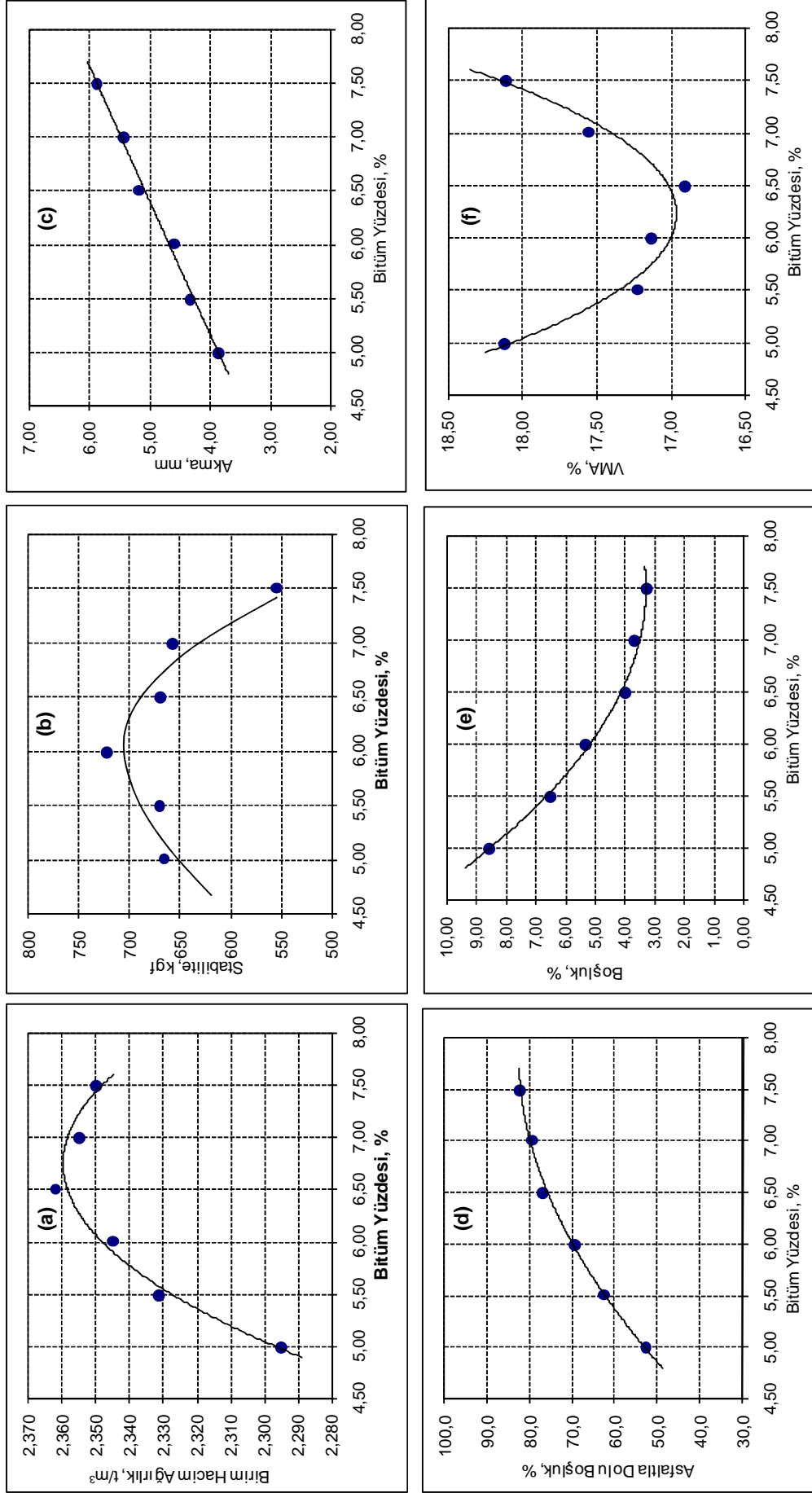
Biriket No	Bitüm		Sıcaklık °C	Biriket Yükseklikleri, mm			Havada Ağırlık, g A	Suda Ağırlık, g C	Doy.Yüz. K. Ağ. g B	Hacim cm ³ V	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³ D _p	Maksimum Teorik Özgül. Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk, % V _i	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	W _a , %	W _a , g		1	2	3													
1	4,00	46,4	136	63,2	63,6	63,7	63,5	706,0	1226,8	520,8	2,354					3,13	1047	1,000	1047
2	4,00	46,4	136	64,8	64,6	65,0	64,8	689,8	1218,1	528,3	2,298					3,54	906	0,968	877
3	4,00	46,4	134	63,2	63,4	63,9	63,5	705,7	1226,8	521,1	2,352					3,28	1064	1,000	1064
4	4,00	46,4	134	63,3	63,9	63,6	63,6	700,2	1217,5	517,3	2,348					2,97	1085	0,998	1082
										2,351	2,565		8,35	15,44	45,9	3,13			1064
5	4,50	52,2	136	62,9	63,0	63,5	63,1	702,6	1210,6	510,1	2,373					3,33	1146	1,000	1146
6	4,50	52,2	136	64,2	64,4	64,5	64,4	714,8	1234,8	520,0	2,371					3,43	1101	0,998	1098
7	4,50	52,2	135	63,3	63,4	63,4	63,4	709,8	1224,6	514,8	2,377					3,54	1122	1,003	1126
8	4,50	52,2	135	64,7	64,8	65,0	64,8	711,5	1236,5	525,0	2,350					3,64	1087	0,967	1051
										2,374	2,547		6,81	15,04	54,7	3,43			1123
9	5,00	58,0	137	63,3	63,3	63,6	63,4	713,3	1223,2	509,9	2,397					3,22	1173	1,003	1176
10	5,00	58,0	137	65,9	65,8	65,4	65,7	735,5	1261,2	525,7	2,398					3,27	1235	0,945	1167
11	5,00	58,0	140	64,4	64,6	64,7	64,6	739,3	1263,4	524,1	2,409					3,88	1216	0,973	1184
12	5,00	58,0	140	57,6	57,8	57,7	57,7	1109,4	1109,4	461,7	2,403					3,53	1047	1,145	1199
										2,402	2,529		5,05	14,45	65,1	3,48			1181
13	5,50	63,8	135	63,3	63,7	63,7	63,6	732,6	1246,2	513,6	2,425					3,70	1183	0,998	1181
14	5,50	63,8	135	65,1	65,2	65,3	65,2	743,6	1266,3	522,7	2,421					3,43	1178	0,958	1128
15	5,50	63,8	133	64,4	64,4	64,6	64,5	740,5	1258,1	517,6	2,429					3,66	1268	0,976	1237
16	5,50	63,8	133	54,5	54,6	54,7	54,6	1057,0	1057,0	435,7	2,424					3,51	1039	1,223	1270
										2,425	2,512		3,48	14,04	75,2	3,58			1204
17	6,00	69,6	132	64,7	65,0	65,0	64,9	740,6	1261,7	521,1	2,421					3,43	1069	0,965	1032
18	6,00	69,6	132	63,9	64,1	64,2	64,1	729,5	1243,2	513,7	2,419					3,86	962	0,986	948
19	6,00	69,6	138	63,5	64,0	64,0	63,8	732,3	1246,8	514,5	2,422					4,41	1053	0,992	1044
20	6,00	69,6	138	64,6	64,7	64,8	64,7	741,6	1261,9	520,3	2,424					3,79	1089	0,970	1056
										2,422	2,495		2,95	14,55	79,7	3,87			1020
21	6,50	75,4	137	64,5	64,5	65,0	64,7	735,1	1254,9	519,8	2,413					4,07	957	0,971	929
22	6,50	75,4	137	65,4	65,8	65,9	65,7	749,1	1277,0	527,9	2,418					4,27	954	0,945	902
23	6,50	75,4	135	65,1	65,2	65,5	65,3	740,5	1263,4	522,9	2,415					4,12	926	0,956	885
24	6,50	75,4	135	64,1	64,2	64,2	64,2	726,4	1242,1	515,7	2,408					4,01	829	0,983	815
										2,414	2,479		2,62	15,23	82,8	4,12			883



Şekil C.2: Aşınma Tip-1 için Statik Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Grafikleri: (a) Birim Hacim Ağırlık (b) Stabilite (c) Akma (d) Asfaltla Dolu Boşluk (e) Boşluk (f) VMA

Tablo C.3: TMA Tip-1 için Marshall Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları

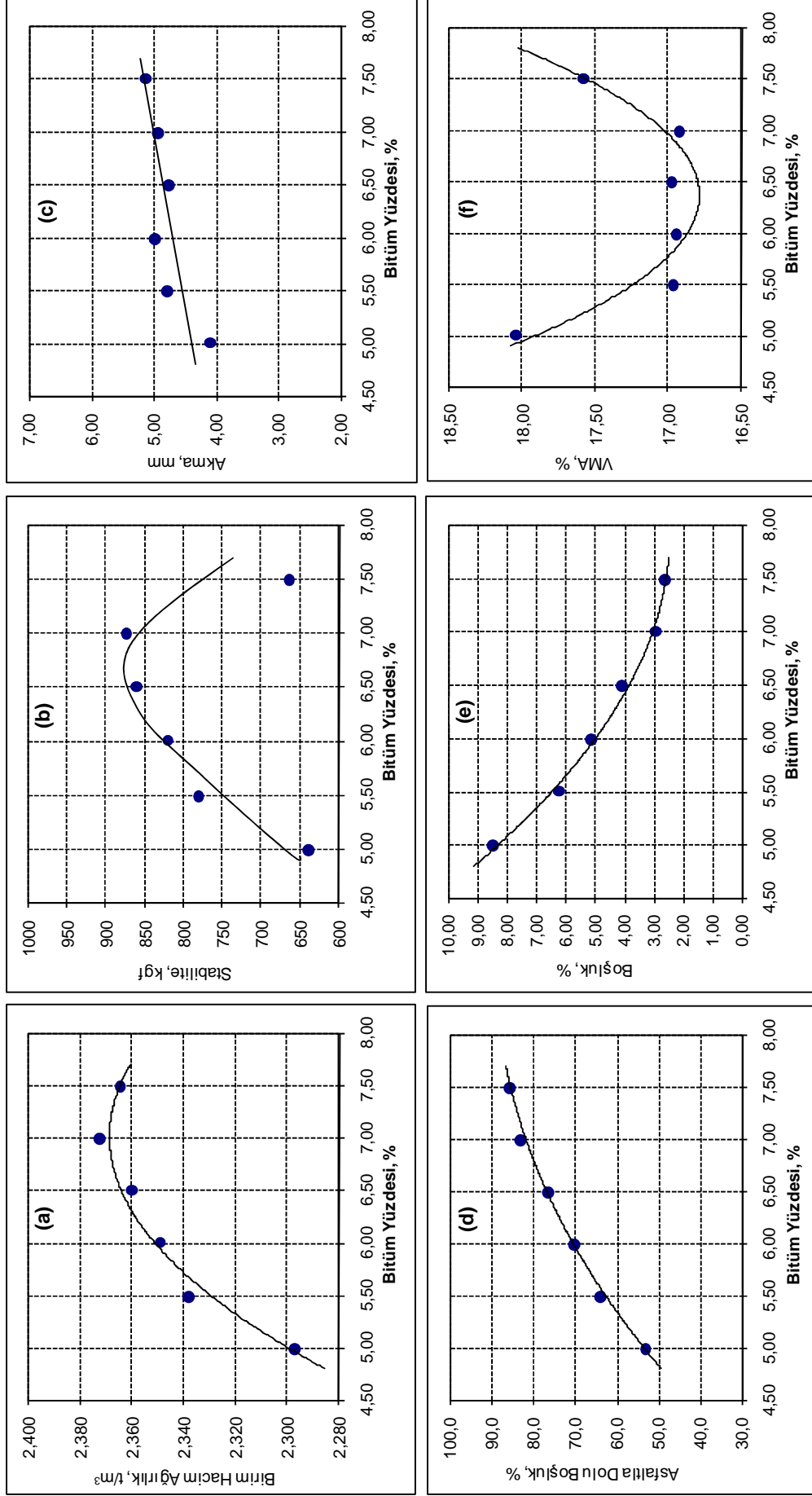
Biriket No	Bitüm W _a , % W _a , g	Sıcaklık °C	Biriket Yükseklikleri, mm			Havada Ağırlık, g A	Suda Ağırlık, g C	Doy. Yüz. K. Ağ. g B	Hacim cm ³ V	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³ D _p	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk, % V _i	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
			1	2	3													
1	5,00 58,0	140	68,3	68,3	68,1	68,2	1220,2	697,3	1228,1	530,8	2,299				3,39	798	0,882	704
2	5,00 58,0	136	68,3	68,6	68,8	68,6	1212,1	694,6	1225,1	530,5	2,285			3,70	749	0,873	654	
3	5,00 58,0	139	68,5	68,6	68,7	68,6	1224,4	702	1236,7	534,7	2,290			3,79	808	0,873	705	
4	5,00 58,0	140	67,4	67,5	67,6	67,5	1209,3	691,4	1216,9	525,5	2,301			4,22	735	0,900	662	
5	5,00 58,0	138	67,2	67,3	67,4	67,3	1202,7	688,0	1211,2	523,2	2,299			4,07	673	0,905	609	
									2,295	2,509	8,53	18,11	52,9	3,83		667		
6	5,50 63,8	135	67,6	67,7	67,8	67,7	1240,7	709,1	1242,5	533,4	2,326			4,07	719	0,895	644	
7	5,50 63,8	135	68,6	68,6	68,8	68,7	1237,1	715,6	1244,8	529,2	2,338			3,00	810	0,871	705	
8	5,50 63,8	134	67,8	68,0	68,2	68,0	1226,8	704,3	1233,7	529,4	2,317			4,77	742	0,888	659	
9	5,50 63,8	135	66,8	66,9	66,9	66,9	1228,7	705,1	1230,8	525,7	2,337			4,92	770	0,916	705	
10	5,50 63,8	140	66,4	66,6	66,6	66,5	1229,4	704,4	1230,5	526,1	2,337			4,91	694	0,924	641	
									2,331	2,492	6,45	17,21	62,5	4,33		671		
11	6,00 69,6	140	67,8	67,8	68,0	67,9	1220,8	697,7	1228,3	530,6	2,301			5,10	783	0,891	698	
12	6,00 69,6	132	65,7	65,7	65,8	65,7	1213,8	695,6	1214,5	518,9	2,339			4,85	781	0,944	737	
13	6,00 69,6	136	66,7	66,7	66,9	66,8	1228,0	706,9	1230,5	523,6	2,345			4,51	783	0,918	719	
14	6,00 69,6	138	65,8	66,0	66,2	66,0	1232,0	708,8	1233,2	524,4	2,349			4,03	740	0,938	694	
15	6,00 69,6	140	65,9	66,1	66,2	66,1	1222,5	701,5	1222,9	521,4	2,345			4,91	786	0,936	736	
									2,345	2,475	5,28	17,12	69,2	4,58		721		
16	6,50 75,4	139	65,6	65,7	65,7	65,7	1228,8	708,5	1229,2	520,7	2,360			5,26	690	0,946	653	
17	6,50 75,4	141	65,9	66,0	66,1	66,0	1220,1	699,5	1220,5	521,0	2,342			5,25	401	0,938	376	
18	6,50 75,4	135	66,4	66,3	66,6	66,4	1232,6	711,7	1233,1	521,4	2,364			4,48	749	0,927	694	
19	6,50 75,4	138	65,7	65,8	65,9	65,8	1224,5	706,5	1225,1	518,6	2,361			5,48	682	0,943	643	
20	6,50 75,4	134	66,0	66,3	66,3	66,2	1232,3	710,4	1231,8	521,4	2,363			5,41	696	0,963	684	
									2,362	2,459	3,94	16,89	76,7	5,16		668		
21	7,00 81,2	141	65,5	65,0	65,2	65,2	1228,8	708,1	1229,2	521,1	2,358			5,43	719	0,957	688	
22	7,00 81,2	134	65,8	66,0	66,1	66,0	1230,3	706,9	1230,8	523,9	2,348			5,25	709	0,938	665	
23	7,00 81,2	140	66,5	66,6	66,7	66,6	1259,0	725,4	1259,2	533,8	2,359			5,14	729	0,923	673	
24	7,00 81,2	140	66,1	66,1	66,4	66,2	1234,3	710,2	1234,6	524,4	2,354			5,85	643	0,933	600	
25	7,00 81,2	133	66,7	66,8	66,9	66,8	1234,7	707,6	1235,0	527,4	2,341			6,81	596	0,918	547	
									2,355	2,443	3,62	17,54	79,4	5,42		656		
26	7,50 87,0	140	65,5	65,5	65,5	65,5	1222,4	702,9	1222,9	520,0	2,351			5,93	565	0,950	537	
27	7,50 87,0	140	65,9	66,1	66,1	66,0	1242,2	714,5	1242,5	528,0	2,353			5,90	617	0,937	578	
28	7,50 87,0	138	65,6	65,6	65,7	65,6	1225,1	704,9	1225,5	520,6	2,353			5,81	615	0,947	582	
29	7,50 87,0	140	66,6	66,7	66,7	66,7	1238,8	710,7	1239,2	528,5	2,344			5,99	616	0,921	567	
30	7,50 87,0	135	66,5	66,7	66,9	66,7	1246,7	716,2	1247,1	530,9	2,348			5,78	550	0,920	506	
									2,350	2,428	3,21	18,10	82,3	5,88		554		



Şekil C.3: TMA Tip-1 için Marshall Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Grafikleri: (a) Birim Hacim Ağırlık (b) Stabilite (c) Akma (d) Asfaltla Dolu Boşluk (e) Boşluk (f) VMA

Tablo C.4: TMA Tip-1 için Statik Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları

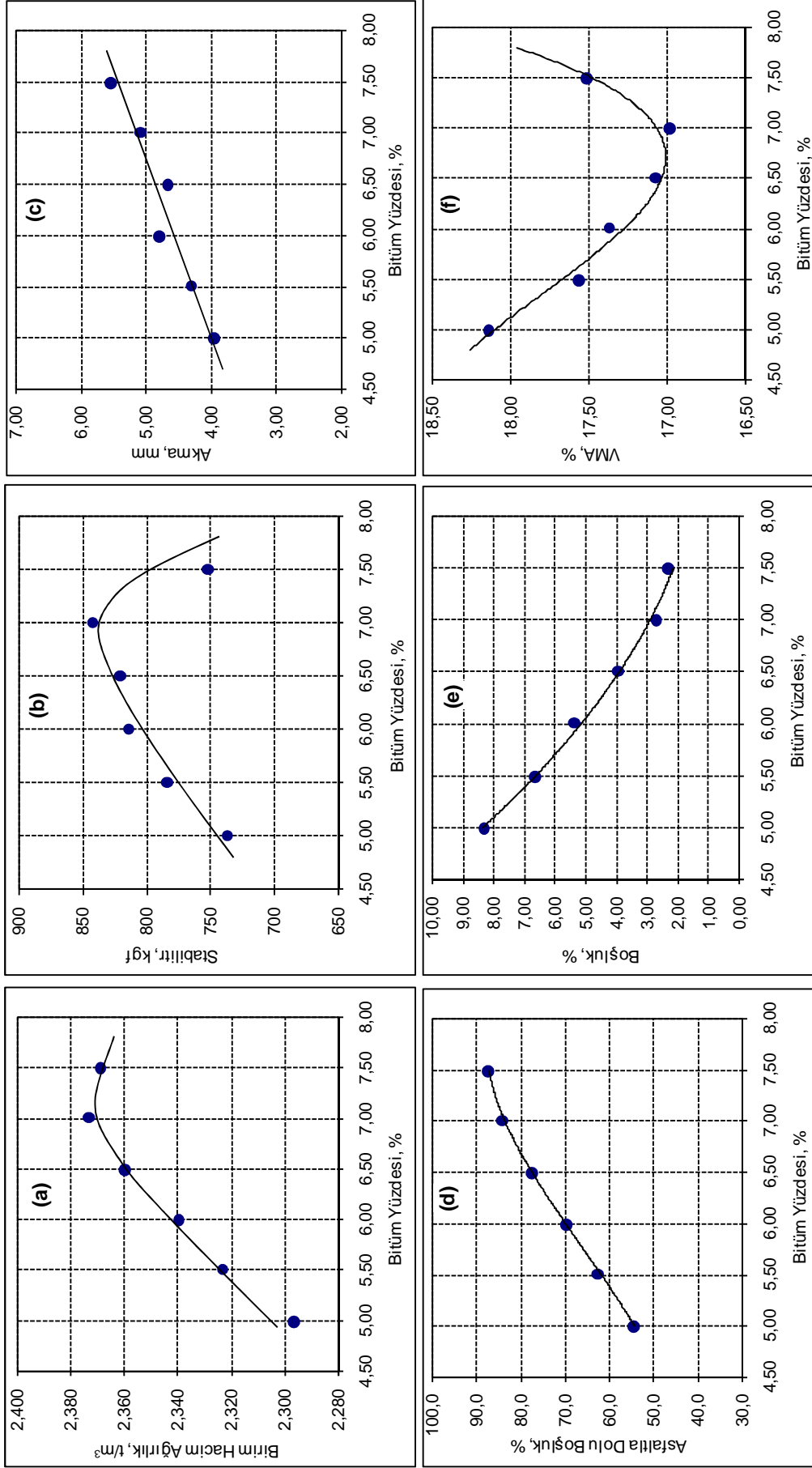
Briket No	Bitüm		Sıcaklık °C	Briket Yükseklikleri, mm					Havada Ağırlık, g	Suda Ağırlık, g	Doy. Yüz. K. Ağı., g	Hacim cm ³	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk, % V _i	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	W _a %	W _b %		1	2	3	Ort.														
1	5,00	58,0	140	64,7	64,7	64,7	64,7	1206,6	684,8	1208,4	523,6	2,304					3,56	718	0,970	696	
2	5,00	58,0	140	66,8	66,8	66,9	66,8	1215,1	694,3	1223,3	529,0	2,297					4,58	658	0,917	603	
3	5,00	58,0	138	65,6	65,8	65,8	65,7	1201,7	685,3	1210,3	525,0	2,289					4,09	650	0,944	614	
4	5,00	58,0	138	65,0	65,0	65,1	65,0	1203,2	687,5	1206,5	519,0	2,318					7,47	988	0,962	950	
											2,297		2,509		8,45	18,04	53,2	4,08			638
5	5,50	63,8	140	60,6	60,6	60,7	60,6	1131,6	650,7	1134,3	483,6	2,340					4,91	756	1,072	810	
6	5,50	63,8	140	64,4	64,7	64,8	64,6	1209,3	694,0	1211,4	517,4	2,337					4,68	782	0,972	760	
7	5,50	63,8	136	61,6	62,5	62,5	62,2	1155,7	663,3	1158,0	494,7	2,336					4,73	751	1,033	775	
8	5,50	63,8	136	60,8	61,3	61,7	61,3	1246,0	720,6	1247,6	527,0	2,364					4,69	1104	1,056	1166	
											2,338		2,492		6,18	16,97	63,6	4,77			782
9	6,00	69,6	138	63,9	64,5	64,5	64,3	1200,4	687,0	1202,1	515,1	2,330					5,00	735	0,980	720	
10	6,00	69,6	138	62,1	62,4	62,7	62,4	1175,2	677,6	1176,0	498,4	2,358					5,08	874	1,028	898	
11	6,00	69,6	140	64,2	64,2	64,3	64,2	1212,2	695,8	1213,3	517,5	2,342					4,54	714	0,982	701	
12	6,00	69,6	140	61,7	61,9	62,0	61,9	1165,8	670,4	1166,9	496,5	2,348					5,29	831	1,041	865	
											2,349		2,475		5,08	16,95	70,0	4,97			821
13	6,50	75,4	135	62,2	62,3	62,4	62,3	1174,7	676,0	1175,3	499,3	2,353					4,45	733	1,030	755	
14	6,50	75,4	135	64,9	65,0	65,3	65,1	1229,5	710,2	1230,1	519,9	2,365					5,17	1085	0,961	1043	
15	6,50	75,4	138	64,5	64,5	64,4	64,5	1215,4	699,3	1216,0	516,7	2,352					4,20	739	0,976	721	
16	6,50	75,4	138	64,6	64,6	64,7	64,6	1245,2	719,9	1245,6	525,7	2,369					5,15	950	0,972	923	
											2,360		2,459		4,04	16,98	76,2	4,74			860
17	7,00	81,2	140	65,9	65,9	66,0	65,9	1261,2	731,0	1261,6	530,6	2,377					4,90	920	0,939	864	
18	7,00	81,2	140	63,2	63,0	67,0	64,4	1211,1	701,6	1211,4	509,8	2,376					5,93	1085	0,978	1061	
19	7,00	81,2	133	63,9	64,2	64,4	64,2	1223,5	708,8	1224,0	515,2	2,375					5,31	944	0,983	928	
20	7,00	81,2	133	65,5	65,5	65,7	65,6	1245,2	718,4	1245,7	527,3	2,361					3,49	682	0,948	647	
											2,372		2,443		2,90	16,93	82,8	4,91			875
21	7,50	87,0	140	63,0	63,0	64,0	63,3	1202,4	694,0	1202,8	508,8	2,363					5,78	742	1,004	745	
22	7,50	87,0	140	65,0	65,1	65,4	65,2	1240,1	715,8	1240,5	524,7	2,363					4,90	628	0,958	602	
23	7,50	87,0	135	60,9	61,0	61,0	61,0	1156,3	667,5	1156,6	489,1	2,364					4,57	589	1,063	626	
24	7,50	87,0	135	63,0	63,4	63,4	63,3	1200,1	693,8	1200,5	506,7	2,368					5,21	684	1,006	688	
											2,365		2,428		2,59	17,57	85,3	5,12			665



Şekil C.4: TMA Tip-1 için Statik Sıkıştırma Yöntemi ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Grafikleri: (a) Birim Hacim Ağırlık (b) Stabilite (c) Akma (d) Asfaltta Dolu Boşluk (e) Boşluk (f) VMA

Tablo C.5: TMA Tip-2 için Statik Sıkıştırma ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Sonuçları

Biriket No	Bitüm		Sıcaklık °C		Biriket Yükseklikleri, mm				Havada Ağırlık, g A	Suda Ağırlık, g C	Dov. Yüz. K. Ağ. g B	Hacim cm ³ V	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³ D _p	Maksimum Teorik Özgül Ağırlık D _t	Boşluk % V _h	VMA %	Asf. Dolu Boşluk, % V _f	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Düzeltilmiş Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kgf)
	W _a %	W _a g	1	2	3	Ort.															
1	5,00	58,0	138	65,5	65,6	65,7	65,6	1218,6	692,3	1223,3	531,0	2,295					3,80	814	0,948	771	
2	5,00	58,0	138	65,1	65,1	64,9	65,0	1202,0	678,9	1204,9	526,0	2,285					4,26	697	0,962	670	
3	5,00	58,0	141	64,2	64,3	64,5	64,3	1198,7	681,9	1201,3	519,4	2,308					3,76	785	0,979	769	
4	5,00	58,0	141	64,6	64,8	65,2	64,9	1242	714,2	1243,1	528,9	2,348					6,47	1159	0,966	1119	
												2,296		2,504	8,33	18,14	54,1	3,94			737
5	5,50	63,8	139	64,7	64,9	65,0	64,9	1210,5	691,2	1214	522,8	2,315					4,39	814	0,966	786	
6	5,50	63,8	139	63,4	63,8	63,7	63,6	1198,5	685,3	1199,2	513,9	2,332					4,02	769	0,997	766	
7	5,50	63,8	138	65,0	65,7	65,7	65,5	1235,3	705,9	1236,7	530,8	2,327					4,51	832	0,951	791	
8	5,50	63,8	138	64,5	64,6	64,9	64,67	1212,4	693,0	1216,0	523,0	2,318					4,11	797	0,971	774	
												2,323		2,488	6,61	17,56	62,4	4,31			782
9	6,00	69,6	139	64,0	64,2	64,5	64,2	1212,8	694,6	1213,5	518,9	2,337					5,04	847	0,982	831	
10	6,00	69,6	139	64,5	64,8	64,9	64,7	1229,4	706,4	1230,4	524,0	2,346					5,14	796	0,969	771	
11	5,00	58,0	137	66,1	66,1	66,3	66,2	1261,4	723,4	1262,9	539,5	2,338					4,26	875	0,933	817	
12	6,00	69,6	137	63,7	64,6	64,2	64,2	1220,6	699,7	1222,1	522,4	2,337					4,67	851	0,983	837	
												2,340		2,471	5,33	17,37	69,3	4,78			814
13	6,50	75,4	132	63,3	63,3	63,5	63,4	1205,4	694,5	1205,8	511,3	2,358					5,24	846	1,003	849	
14	6,50	75,4	132	66,0	66,1	66,1	66,1	1250,8	718,5	1251,7	533,2	2,346					4,33	786	0,936	736	
15	6,50	75,4	138	65,4	65,8	65,9	65,7	1254,3	724,9	1254,6	529,7	2,368					4,28	978	0,945	924	
16	6,50	75,4	138	64,7	64,7	64,9	64,8	1217,5	700,2	1217,8	517,6	2,352					4,82	795	0,968	770	
												2,359		2,455	3,90	17,07	77,1	4,67			820
17	7,00	81,2	138	64,3	64,5	64,7	64,5	1230,2	710,9	1230,7	519,8	2,367					4,93	801	0,975	781	
18	7,00	81,2	138	64,1	64,3	64,3	64,2	1225,8	711,0	1226,3	515,3	2,379					5,34	908	0,982	891	
19	7,00	81,2	139	64,3	64,5	64,6	64,5	1230,1	712,7	1230,5	517,8	2,376					5,51	973	0,976	949	
20	7,00	81,2	139	64,1	64,1	64,2	64,1	1225,4	708,8	1225,8	517,0	2,370					4,50	759	0,984	747	
												2,373		2,439	2,72	16,98	84,0	5,07			842
21	7,50	87,0	137	64,0	64,4	64,5	64,3	1222,4	706,9	1222,6	515,7	2,370					5,73	773	0,980	758	
22	7,50	87,0	137	66,3	66,5	66,6	66,5	1266,0	732,1	1266,4	534,3	2,369					5,64	814	0,926	754	
23	7,50	87,0	136	65,2	65,4	65,4	65,3	1240,4	716,9	1240,8	523,9	2,368					5,13	789	0,954	753	
24	7,50	87,0	136	63,8	63,8	64,2	63,9	1211,2	700,1	1211,6	511,5	2,368					5,57	749	0,989	741	
												2,369		2,424	2,27	17,51	87,0	5,52			751



Şekil C.5: TMA Tip-2 için Statik Sıkıştırma ile Hazırlanan Numunelere ait Marshall Tasarım Grafikleri: (a) Birim Hacim Ağırlık (b) Stabilite (c) Akma (d) Asfaltla Dolu Boşluk (e) Boşluk (f) VMA

EK D: Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deney Numunelerinin Hacimsel Analizi

Tablo D.1: ÜKM Deney Numunelerinin Hacimsel Özellikleri

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doğru Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Boşluk, V _h (%)	VMA (%)	Bitümle Dolu Boşluk, V _f (%)
			1	2	3	Ortalama								
A1111	5,00	140	150,8	150,8	150,7	150,8	2910,9	1701,8	2914,8	1213,0	2,400	5,12	14,51	64,7
A1112	5,00	139	150,3	150,3	150,4	150,3	2905,1	1696,3	2908,1	1211,8	2,397	5,22	14,60	64,3
A1113	5,00	137	150,0	149,8	150,2	150,0	2909,8	1705,9	2912,6	1206,7	2,411	4,66	14,10	66,9
A1114	5,00	136	150,4	150,5	150,7	150,5	2914,2	1703,6	2917,2	1213,6	2,401	5,06	14,46	65,0
A1211	5,50	139	150,6	150,6	151,0	150,7	2933,0	1722,9	2934,7	1211,8	2,420	3,65	14,19	74,3
A1212	5,50	136	150,3	150,4	150,5	150,4	2937,1	1723,9	2939,0	1215,1	2,417	3,78	14,30	73,6
A1213	5,50	135	150,7	150,8	150,9	150,8	2927,9	1717,6	2929,6	1212,0	2,416	3,83	14,35	73,3
A1214	5,50	136	150,3	150,6	150,7	150,5	2943,6	1729,2	2945,0	1215,8	2,421	3,62	14,16	74,5
A1311	6,00	134	150,4	150,5	150,6	150,5	2950,3	1736,2	2951,1	1214,9	2,428	2,67	14,31	81,3
A1312	6,00	136	150,7	150,8	150,9	150,8	2951,0	1738,7	2951,6	1212,9	2,433	2,49	14,15	82,4
A1313	6,00	137	150,2	150,5	150,6	150,4	2951,0	1738,7	2951,6	1212,9	2,433	2,49	14,15	82,4
A1314	6,00	138	150,5	150,7	150,8	150,7	2948,5	1736,9	2949,5	1212,6	2,432	2,55	14,20	82,1
A1121	5,00	140	150,4	149,9	150,3	150,2	2927,1	1714,5	2929,6	1215,1	2,409	4,76	14,19	66,5
A1122	5,00	137	150,7	150,4	150,8	150,6	2919,9	1708,9	2922,2	1213,3	2,407	4,85	14,27	66,0
A1123	5,00	133	150,5	150,5	150,1	150,4	2895,2	1690,2	2897,9	1207,7	2,397	5,22	14,60	64,2
A1124	5,00	135	150,4	150,6	150,6	150,5	2902,3	1694,4	2904,5	1210,1	2,398	5,18	14,56	64,5
A1221	5,50	139	150,5	150,6	150,7	150,6	2939,7	1726,9	2940,2	1213,3	2,423	3,55	14,10	74,8
A1222	5,50	132	150,4	150,3	150,1	150,3	2922,8	1714,3	2923,7	1209,4	2,417	3,79	14,32	73,5
A1223	5,50	136	150,5	150,7	150,2	150,5	2929,2	1719,2	2930,3	1211,1	2,419	3,72	14,25	73,9
A1224	5,50	139	150,3	150,7	150,5	150,5	2935,5	1722,4	2936,6	1214,2	2,418	3,76	14,29	73,7
A1321	6,00	133	150,6	150,5	150,8	150,6	2959,8	1742,9	2960,3	1217,4	2,431	2,56	14,21	82,0
A1322	6,00	138	150,6	150,6	150,6	150,6	2953,4	1740,4	2953,9	1213,5	2,434	2,46	14,12	82,6
A1323	6,00	137	150,5	150,3	150,3	150,4	2950,6	1738,6	2951,2	1212,6	2,433	2,48	14,14	82,5
A1324	6,00	139	150,6	150,4	150,5	150,5	2951,6	1739,8	2951,9	1212,1	2,435	2,40	14,07	82,9
A11'31	4,50	140	150,3	150,4	150,5	150,4	2878,1	1674,1	2884,4	1210,3	2,378	6,64	14,88	55,4
A11'32	4,50	136	150,9	150,6	150,7	150,7	2886,7	1674,9	2891,3	1216,4	2,373	6,83	15,06	54,7
A11'33	4,50	135	150,8	150,9	151,0	150,9	2885,3	1679,2	2891,4	1212,2	2,380	6,55	14,80	55,8
A11'34	4,50	137	149,9	150,1	150,1	150,0	2870,6	1668,4	2876,6	1208,2	2,376	6,72	14,96	55,1
A1131	5,00	139	150,6	150,7	151,0	150,8	2909,1	1696,4	2912,1	1215,7	2,393	5,39	14,76	63,5
A1132	5,00	136	150,7	150,7	150,8	150,7	2910,9	1699,0	2912,6	1213,6	2,399	5,17	14,56	64,5
A1133	5,00	134	150,4	150,6	150,9	150,6	2918,3	1704,2	2920,2	1216,0	2,400	5,12	14,51	64,7
A1134	5,00	135	149,8	149,8	150,1	149,9	2898,9	1692,9	2901,2	1208,3	2,399	5,15	14,54	64,6
A1231	5,50	140	149,9	150,0	150,1	150,0	2934,1	1721,4	2935,2	1213,8	2,417	3,77	14,30	73,6
A1232	5,50	135	150,2	150,5	150,4	150,4	2934,9	1723,7	2936,8	1213,1	2,419	3,69	14,23	74,1
A1233	5,50	135	150,6	150,7	150,7	150,7	2927,2	1716,5	2928,4	1211,9	2,415	3,85	14,37	73,2
A1234	5,50	136	150,0	150,1	150,2	150,1	2924,8	1716,9	2925,6	1208,7	2,420	3,67	14,21	74,2
A1331	6,00	138	149,7	150,1	150,3	150,0	2931,7	1724,3	2932,2	1207,9	2,427	2,72	14,36	81,0
A1332	6,00	135	150,4	150,6	150,6	150,5	2946,8	1732,7	2947,4	1214,7	2,426	2,77	14,40	80,8
A1333	6,00	139	150,4	149,8	151,2	150,5	2953,9	1737,7	2954,2	1216,5	2,428	2,68	14,32	81,3
A1334	6,00	135	151,2	151,2	151,4	151,3	2959,1	1740,3	2959,5	1219,2	2,427	2,72	14,36	81,0
A2211	5,50	135	149,5	149,6	149,7	149,6	2903,6	1698,4	2905,5	1207,1	2,405	4,24	14,72	71,2
A2212	5,50	135	150,5	150,6	150,7	150,6	2925,6	1711,8	2927,6	1215,8	2,406	4,21	14,69	71,4
A2213	5,50	136	150,0	150,2	150,4	150,2	2923,3	1711,0	2924,8	1213,8	2,408	4,12	14,61	71,8
A2214	5,50	140	151,5	151,7	152,0	151,7	2951,0	1731,6	2952,2	1220,6	2,418	3,76	14,28	73,7
A2221	5,50	140	150,1	150,3	150,5	150,3	2924,3	1711,3	2925,4	1214,1	2,409	4,12	14,61	71,8

Tablo D.1: ÜKM Deney Numunelerinin Hacimsel Özellikleri (Devamı)

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Boşluk, V _h (%)	VMA (%)	Bitümle Dolu Boşluk, V _f (%)
			1	2	3	Ortalama								
A2222	5,50	138	149,7	149,8	149,9	149,8	2923,7	1712,2	2925,0	1212,8	2,411	4,03	14,53	72,2
A2223	5,50	138	150,4	150,5	150,5	150,5	2918,0	1708,7	2919,5	1210,8	2,410	4,06	14,56	72,1
A2224	5,50	139	149,6	149,9	150,1	149,9	2905,4	1701,0	2906,8	1205,8	2,410	4,08	14,57	72,0
A2231	5,50	139	150,5	150,6	150,6	150,6	2926,1	1712,1	2927,7	1215,6	2,407	4,17	14,66	71,5
A2232	5,50	139	150,5	150,6	150,6	150,6	2917,5	1706,6	2919,1	1212,5	2,406	4,21	14,69	71,3
A2233	5,50	139	150,2	150,4	150,5	150,4	2927,1	1712,2	2929,0	1216,8	2,406	4,24	14,71	71,2
A2234	5,50	134	150,5	150,5	150,7	150,6	2920,4	1709,3	2921,6	1212,3	2,409	4,10	14,59	71,9
A3211	5,50	137	150,0	150,4	150,4	150,3	2905,7	1697,2	2908,1	1210,9	2,400	4,47	14,92	70,0
A3212	5,50	135	150,7	150,9	150,5	150,7	2919,5	1706,2	2920,9	1214,7	2,403	4,32	14,79	70,8
A3213	5,50	136	150,5	149,8	150,1	150,1	2914,4	1705,2	2915,9	1210,7	2,407	4,17	14,66	71,5
A3214	5,50	130	149,4	149,9	149,3	149,5	2894,8	1690,7	2896,5	1205,8	2,401	4,43	14,89	70,2
A3221	5,50	132	150,1	150,1	150,2	150,1	2907,2	1698,3	2908,6	1210,3	2,402	4,38	14,84	70,5
A3222	5,50	137	150,1	150,0	149,9	150,0	2889,1	1684,5	2890,5	1206,0	2,396	4,63	15,07	69,2
A3223	5,50	138	150,0	149,9	149,8	149,9	2905,5	1698,6	2906,9	1208,3	2,405	4,27	14,75	71,0
A3224	5,50	133	150,3	150,4	150,2	150,3	2914,8	1704,1	2916,6	1212,5	2,404	4,30	14,77	70,9
A3231	5,50	131	149,9	150,1	150,0	150,0	2917,2	1708,8	2918,3	1209,5	2,412	3,98	14,49	72,5
A3232	5,50	136	149,8	149,4	149,8	149,7	2903,9	1699,8	2905,2	1205,4	2,409	4,10	14,59	71,9
A3233	5,50	134	150,4	150,2	150,2	150,3	2915,6	1705,3	2917,2	1211,9	2,406	4,23	14,71	71,3
A3234	5,50	135	150,0	150,0	150,5	150,2	2920,5	1708,7	2921,6	1212,9	2,408	4,15	14,63	71,7
S1111	6,00	133	151,2	151,1	151,2	151,2	2823,3	1616,6	2826,6	1210,0	2,333	5,73	17,52	67,3
S1112	6,00	139	150,7	150,7	150,9	150,8	2819,2	1612,9	2821,9	1209,0	2,332	5,79	17,57	67,0
S1113	6,00	137	150,9	151,2	151,2	151,1	2829,0	1620,8	2830,8	1210,0	2,338	5,54	17,36	68,1
S1114	6,00	134	150,5	150,7	151,1	150,8	2823,8	1619,5	2825,7	1206,2	2,341	5,42	17,25	68,6
S1211	6,50	140	150,7	151,0	151,1	150,9	2836,2	1631,6	2837,8	1206,2	2,351	4,38	17,27	74,7
S1212	6,50	137	150,8	151,2	151,5	151,2	2843,8	1634,2	2846,2	1212,0	2,346	4,58	17,45	73,8
S1213	6,50	138	150,5	150,8	150,8	150,7	2834,1	1629,5	2835,2	1205,7	2,351	4,41	17,30	74,5
S1214	6,50	139	150,6	150,6	151,0	150,7	2819,7	1618,4	2821,3	1202,9	2,344	4,67	17,53	73,3
S1311	7,50	140	150,6	150,8	151,3	150,9	2867,3	1655,9	2867,7	1211,8	2,366	2,53	17,53	85,5
S1312	7,50	138	150,2	150,3	150,5	150,3	2852,1	1645,4	2852,5	1207,1	2,363	2,67	17,65	84,9
S1313	7,50	140	150,1	150,2	150,4	150,2	2850,8	1644,6	2851,4	1206,8	2,362	2,69	17,66	84,8
S1314	7,50	136	150,3	150,5	151,0	150,6	2850,5	1643,4	2850,8	1207,4	2,361	2,75	17,71	84,5
S1121	6,00	138	149,9	150,0	150,2	150,0	2807,1	1613,7	2812,5	1198,8	2,342	5,40	17,23	68,7
S1122	6,00	141	149,9	150,1	150,3	150,1	2811,3	1610,7	2813,4	1202,7	2,337	5,56	17,37	68,0
S1123	6,00	140	150,0	150,1	150,2	150,1	2806,8	1608,7	2809,0	1200,3	2,338	5,53	17,34	68,1
S1124	6,00	134	149,5	149,6	149,9	149,7	2803,2	1605,7	2805,3	1199,6	2,337	5,59	17,40	67,9
S1221	6,50	139	149,7	149,7	149,9	149,8	2822,3	1621,8	2824,1	1202,3	2,347	4,54	17,41	73,9
S1222	6,50	140	150,7	150,9	151,0	150,9	2836,0	1629,0	2837,8	1208,8	2,346	4,59	17,46	73,7
S1223	6,50	140	150,2	150,3	150,5	150,3	2835,0	1630,4	2836,3	1205,9	2,351	4,39	17,29	74,6
S1224	6,50	135	150,1	150,5	150,2	150,3	2851,3	1647,5	2852,4	1204,9	2,366	3,76	16,74	77,5
S1321	7,50	140	150,2	150,3	150,5	150,3	2851,8	1645,9	2851,9	1206,0	2,365	2,59	17,58	85,2
S1322	7,50	141	150,3	150,4	150,6	150,4	2857,3	1649,4	2857,8	1208,4	2,365	2,60	17,58	85,2
S1323	7,50	139	149,5	149,8	149,8	149,7	2851,2	1645,2	2852,0	1206,8	2,363	2,68	17,65	84,8
S1324	7,50	137	150,3	150,6	150,6	150,5	2860,0	1650,9	2860,8	1209,9	2,364	2,63	17,61	85,1
S11*31	5,50	135	150,0	150,0	150,0	150,0	2830,4	1624,0	2833,4	1209,4	2,340	6,08	16,88	64,0
S11*32	5,50	139	150,1	150,1	150,0	150,1	2818,5	1613,8	2822,0	1208,2	2,333	6,38	17,15	62,8
S11*33	5,50	143	150,7	150,7	150,8	150,7	2832,0	1630,4	2834,3	1203,9	2,352	5,59	16,45	66,0
S11*34	5,50	135	149,9	149,9	150,1	150,0	2827,6	1619,5	2830,1	1210,6	2,336	6,26	17,05	63,3
S1131	6,00	140	150,1	150,0	150,2	150,1	2886,0	1656,7	2887,1	1230,4	2,346	5,24	17,09	69,4
S1132	6,00	138	149,6	150,1	150,0	149,9	2870,8	1649,5	2871,8	1222,3	2,349	5,11	16,98	69,9

Tablo D.1: ÜKM Deney Numunelerinin Hacimsel Özellikleri (Devamı)

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doğru Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Boşluk, V _h (%)	VMA (%)	Bitümlü Dolu Boşluk, V _f (%)
			1	2	3	Ortalama								
S1133	6,00	141	150,8	151,1	150,8	150,9	2870,7	1647,5	2873,0	1225,5	2,342	5,36	17,20	68,8
S1134	6,00	140	150,2	150,2	150,3	150,2	2857,8	1643,7	2859,1	1215,4	2,351	5,00	16,88	70,4
S1231	6,50	137	149,9	150,0	150,0	150,0	2846,5	1637,2	2847,9	1210,7	2,351	4,39	17,28	74,6
S1232	6,50	139	150,2	150,2	150,0	150,1	2831,1	1626,6	2832,6	1206,0	2,348	4,53	17,41	74,0
S1233	6,50	136	149,5	149,7	150,0	149,7	2858,5	1646,9	2859,6	1212,7	2,357	4,14	17,07	75,7
S1234	6,50	138	149,9	149,8	149,9	149,9	2837,7	1632,4	2839,0	1206,6	2,352	4,36	17,26	74,7
S13'31	7,00	140	150,4	150,5	150,5	150,5	2853,5	1647,4	2854,2	1206,8	2,365	3,22	17,20	81,3
S13'32	7,00	138	150,4	150,5	150,6	150,5	2870,8	1656,5	2871,4	1214,9	2,363	3,28	17,25	81,0
S13'33	7,00	139	150,4	150,5	150,6	150,5	2854,4	1647,9	2854,8	1206,9	2,365	3,20	17,18	81,4
S13'34	7,00	132	149,8	149,9	150,4	150,0	2870,2	1657,0	2870,5	1213,5	2,365	3,19	17,17	81,4
S1331	7,50	133	150,2	150,2	150,4	150,3	2858,7	1647,4	2859,1	1211,7	2,359	2,82	17,77	84,1
S1332	7,50	140	150,1	150,4	150,4	150,3	2867,7	1653,6	2867,8	1214,2	2,362	2,71	17,68	84,7
S1333	7,50	140	149,5	149,5	149,5	149,5	2864,3	1650,4	2864,4	1214,0	2,359	2,81	17,76	84,2
S1334	7,50	142	150,0	150,0	150,0	150,0	2847,2	1640,5	2847,6	1207,1	2,359	2,84	17,79	84,0
S2211	6,50	139	150,2	150,3	150,5	150,3	2819,2	1615,9	2822,1	1206,2	2,337	4,95	17,77	72,1
S2212	6,50	140	150,0	150,1	150,3	150,1	2826,3	1621,5	2828,5	1207,0	2,342	4,77	17,62	72,9
S2213	6,50	142	150,4	150,5	150,6	150,5	2830,6	1626,7	2832,5	1205,8	2,347	4,53	17,41	74,0
S2214	6,50	141	149,4	149,5	149,6	149,5	2819,4	1620,8	2821,9	1201,1	2,347	4,54	17,41	73,9
S2221	6,50	139	149,8	149,9	149,9	149,9	2824,0	1620,7	2826,0	1205,3	2,343	4,72	17,57	73,1
S2222	6,50	138	149,6	149,9	150,0	149,8	2839,1	1630,6	2840,8	1210,2	2,346	4,60	17,46	73,7
S2223	6,50	140	150,0	150,0	150,1	150,0	2820,9	1622,2	2822,3	1200,1	2,351	4,41	17,30	74,5
S2224	6,50	140	150,0	150,3	150,5	150,3	2829,7	1623,0	2831,4	1208,4	2,342	4,77	17,61	72,9
S2131	6,00	140	150,8	150,5	150,3	150,5	2813,5	1607,9	2816,5	1208,6	2,328	5,95	17,71	66,4
S2132	6,00	138	150,8	150,5	150,5	150,6	2812,5	1611,3	2815,6	1204,3	2,335	5,65	17,45	67,6
S2133	6,00	140	150,8	150,6	150,5	150,6	2825,2	1615,3	2828,0	1212,7	2,330	5,88	17,65	66,7
S2134	6,00	142	149,8	150,4	149,5	149,9	2792,7	1599,8	2797,0	1197,2	2,333	5,76	17,54	67,2
S2231	6,50	141	149,8	150,4	149,7	150,0	2827,8	1626,5	2829,9	1203,4	2,350	4,44	17,33	74,4
S2232	6,50	139	150,8	150,2	150,6	150,5	2832,8	1626,3	2835,1	1208,8	2,343	4,70	17,55	73,2
S2233	6,50	136	150,0	149,8	149,7	149,8	2804,1	1609,1	2807,2	1198,1	2,340	4,82	17,66	72,7
S2234	6,50	134	150,2	149,9	150,0	150,0	2841,5	1636,2	2843,2	1207,0	2,354	4,26	17,17	75,2
S2331	7,50	135	150,6	150,7	150,7	150,7	2854,8	1647,1	2855,9	1208,8	2,362	3,34	17,30	80,7
S2332	7,50	140	150,5	150,5	150,2	150,4	2851,6	1645,0	2852,5	1207,5	2,362	3,34	17,30	80,7
S2333	7,50	140	150,5	150,6	150,5	150,5	2845,0	1638,8	2846,3	1207,5	2,356	3,57	17,49	79,6
S2334	7,50	135	150,4	150,2	150,4	150,3	2858,0	1649,3	2859,2	1209,9	2,362	3,32	17,28	80,8
S3211	6,50	138	150,7	150,8	150,9	150,8	2829,5	1621,8	2831,4	1209,6	2,339	4,87	17,70	72,5
S3212	6,50	135	150,7	150,8	150,6	150,7	2829,7	1618,0	2831,6	1213,6	2,332	5,18	17,97	71,2
S3213	6,50	134	150,6	150,7	150,8	150,7	2825,8	1616,7	2827,7	1211,0	2,333	5,11	17,90	71,5
S3214	6,50	140	150,7	150,7	150,8	150,7	2825,2	1615,2	2826,4	1211,2	2,333	5,14	17,94	71,3
S3221	6,50	141	151,0	151,3	151,0	151,1	2835,0	1624,7	2836,4	1211,7	2,340	4,85	17,68	72,6
S3222	6,50	140	151,0	151,0	151,1	151,0	2838,4	1624,3	2839,5	1215,2	2,336	5,01	17,82	71,9
S3223	6,50	139	150,7	150,6	150,5	150,6	2836,6	1625,0	2837,4	1212,4	2,340	4,85	17,69	72,6
S3224	6,50	134	150,2	150,3	150,5	150,3	2827,0	1618,9	2828,2	1209,3	2,338	4,93	17,75	72,2
S3131	6,00	135	150,3	150,0	149,7	150,0	2793,5	1597,3	2798,8	1201,5	2,325	6,05	17,81	66,0
S3132	6,00	135	150,6	150,6	150,4	150,5	2798,2	1600,8	2801,2	1200,4	2,331	5,81	17,60	67,0
S3133	6,00	140	150,2	150,6	150,5	150,4	2803,6	1602,6	2807,6	1205,0	2,327	5,99	17,76	66,3
S3134	6,00	140	150,5	150,7	151,1	150,8	2820,5	1613,3	2823,8	1210,5	2,330	5,85	17,64	66,8
S3231	6,50	139	150,7	150,2	150,4	150,4	2832,2	1630,8	2834,6	1203,8	2,353	4,32	17,23	74,9
S3232	6,50	137	150,7	150,5	151,0	150,7	2836,4	1630,9	2838,7	1207,8	2,348	4,50	17,38	74,1
S3233	6,50	142	150,4	150,7	150,4	150,5	2842,4	1637,2	2845,1	1207,9	2,353	4,30	17,21	75,0

Tablo D.1: ÜKM Deney Numunelerinin Hacimsel Özellikleri (Devamı)

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Boşluk, V _h (%)	VMA (%)	Bitümle Dolu Boşluk, V _f (%)
			1	2	3	Ort.								
S3234	6,50	142	151,6	151,3	151,0	151,3	2845,7	1638,8	2847,8	1209,0	2,354	4,28	17,19	75,1
S3331	7,50	141	151,2	151,3	151,3	151,3	2868,0	1651,3	2869,3	1218,0	2,355	3,64	17,54	79,3
S3332	7,50	137	150,6	150,9	150,5	150,7	2864,4	1653,3	2865,7	1212,4	2,363	3,31	17,27	80,8
S3333	7,50	140	150,7	150,8	150,8	150,8	2848,5	1640,0	2849,9	1209,9	2,354	3,65	17,56	79,2
S3334	7,50	136	150,5	150,3	150,5	150,4	2844,4	1636,6	2845,3	1208,7	2,353	3,69	17,59	79,0
S4211	6,50	155	150,7	150,7	150,8	150,7	2875,5	1665,7	2876,7	1211,0	2,374	3,44	16,46	79,1
S4212	6,50	157	150,3	150,3	150,4	150,3	2893,8	1678,7	2894,2	1215,5	2,381	3,18	16,24	80,4
S4213	6,50	153	150,0	150,5	150,6	150,4	2873,7	1661,6	2875,3	1213,7	2,368	3,71	16,70	77,8
S4214	6,50	154	150,6	150,6	150,7	150,6	2873,7	1663,1	2874,7	1211,6	2,372	3,55	16,55	78,6
S4221	6,50	152	150,5	150,6	150,6	150,6	2873,6	1662,6	2875,3	1212,7	2,370	3,64	16,63	78,1
S4222	6,50	161	150,0	150,1	150,2	150,1	2872,4	1661,5	2873,5	1212,0	2,370	3,62	16,62	78,2
S4223	6,50	157	150,5	150,6	150,6	150,6	2874,5	1664,3	2875,4	1211,1	2,373	3,48	16,50	78,9
S4224	6,50	156	150,5	150,7	150,7	150,6	2893,9	1676,0	2894,5	1218,5	2,375	3,42	16,44	79,2
S4231	6,50	158	150,1	150,6	150,0	150,2	2863,5	1649,0	2865,4	1216,4	2,354	4,27	17,18	75,2
S4232	6,50	156	150,5	150,5	150,3	150,4	2871,6	1656,3	2872,6	1216,3	2,361	3,99	16,94	76,5
S4233	6,50	160	150,8	150,9	151,0	150,9	2865,1	1651,0	2865,9	1214,9	2,358	4,10	17,03	76,0
S4234	6,50	154	150,5	150,5	150,2	150,4	2877,3	1660,4	2877,2	1216,8	2,365	3,84	16,81	77,2
S42'31	7,00	160	150,7	150,5	150,5	150,6	2872,1	1653,1	2871,7	1218,6	2,357	4,15	17,47	76,2
S42'32	7,00	157	150,7	150,7	150,8	150,7	2882,9	1659,2	2882,2	1223,0	2,357	3,51	17,45	79,9
S42'33	7,00	155	150,9	151,1	150,8	150,9	2875,4	1653,7	2875,1	1221,4	2,354	3,64	17,56	79,3
S42'34	7,00	153	150,8	150,5	150,5	150,6	2879,8	1654,7	2879,8	1225,1	2,351	3,78	17,68	78,6
S4331	7,50	153	151,0	150,8	150,9	150,9	2861,4	1641,5	2861,7	1220,2	2,345	3,40	18,26	81,4
S4332	7,50	152	150,6	150,9	150,9	150,8	2861,7	1640,9	2862,0	1221,1	2,344	3,46	18,32	81,1
S'1111	6,50	136	150,4	150,3	150,2	150,3	2836,2	1628,2	2837,3	1209,1	2,346	5,07	17,54	71,1
S'1112	6,50	138	150,6	150,8	150,9	150,8	2853,1	1640,6	2854,5	1213,9	2,350	4,88	17,38	71,9
S'1113	6,50	141	150,6	150,2	150,5	150,4	2844,0	1635,8	2845,2	1209,4	2,352	4,83	17,34	72,1
S'1114	6,50	140	150,3	150,1	150,1	150,2	2834,7	1629,6	2835,5	1205,9	2,351	4,87	17,37	72,0
S'1211	7,00	141	150,5	150,2	150,7	150,5	2861,8	1653,6	2862,6	1209,0	2,367	3,58	17,18	79,2
S'1212	7,00	136	150,7	150,4	150,4	150,5	2884,0	1665,0	2884,5	1219,5	2,365	3,67	17,26	78,7
S'1213	7,00	140	150,2	150,1	150,4	150,2	2859,6	1652,4	2860,3	1207,9	2,367	3,57	17,17	79,2
S'1214	7,00	139	151,3	150,7	150,5	150,8	2866,5	1656,2	2867,0	1210,8	2,367	3,57	17,17	79,2
S'1311	7,50	137	150,7	150,7	150,7	150,7	2876,5	1663,1	2876,8	1213,7	2,370	2,84	17,46	83,7
S'1312	7,50	138	150,2	150,2	150,1	150,2	2856,3	1649,2	2856,9	1207,7	2,365	3,04	17,64	82,7
S'1313	7,50	140	150,4	150,5	150,3	150,4	2865,1	1655,7	2865,1	1209,4	2,369	2,88	17,50	83,5
S'1314	7,50	139	150,1	150,5	150,7	150,4	2866,6	1657,6	2866,7	1209,1	2,371	2,81	17,44	83,9
S'1121	6,50	135	150,2	150,1	150,3	150,2	2846,9	1641,8	2847,8	1206,0	2,361	3,84	17,02	77,4
S'1122	6,50	140	150,2	150,2	150,2	150,2	2852,0	1644,6	2853,0	1208,4	2,360	3,86	17,04	77,3
S'1123	6,50	138	150,3	150,5	150,2	150,3	2838,1	1634,1	2838,8	1204,7	2,356	4,04	17,19	76,5
S'1124	6,50	140	150,5	150,5	150,4	150,5	2854,3	1646,6	2855,3	1208,7	2,361	3,81	16,99	77,6
S'1221	7,00	138	150,3	150,2	150,2	150,2	2870,2	1659,5	2870,7	1211,2	2,370	2,85	17,09	83,3
S'1222	7,00	139	150,5	150,3	150,7	150,5	2862,5	1655,0	2862,9	1207,9	2,370	2,85	17,09	83,3
S'1223	7,00	140	150,2	150,5	150,6	150,4	2864,8	1653,8	2865,4	1211,6	2,364	3,06	17,27	82,3
S'1224	7,00	141	150,6	150,4	150,5	150,5	2852,8	1652,8	2859,0	1206,2	2,365	3,04	17,25	82,4
S'1321	7,50	137	150,4	150,2	150,2	150,3	2866,8	1657,2	2867,1	1209,9	2,369	2,24	17,48	87,2
S'1322	7,50	141	150,4	150,3	150,5	150,4	2858,7	1652,1	2859,0	1206,9	2,369	2,28	17,51	87,0
S'1323	7,50	140	150,6	150,5	150,3	150,5	2856,1	1650,7	2856,3	1205,6	2,369	2,26	17,50	87,1
S'1324	7,50	138	150,2	150,5	150,5	150,4	2858,3	1652,0	2858,6	1206,6	2,369	2,27	17,50	87,1
S'1131	6,50	141	150,2	150,2	150,3	150,2	2866,9	1651,8	2867,7	1215,9	2,358	3,96	17,12	76,9
S'1132	6,50	139	150,4	150,5	150,5	150,5	2860,8	1646,3	2861,2	1214,9	2,355	4,08	17,23	76,3
S'1133	6,50	139	150,3	150,4	150,3	150,3	2861,7	1649,4	2862,1	1212,7	2,360	3,88	17,05	77,3

Tablo D.1: ÜKM Deney Numunelerinin Hacimsel Özellikleri (Devamı)

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havadaki Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Boşluk, V _h (%)	VMA (%)	Bitümle Dolu Boşluk, V _r (%)
			1	2	3	Ortalama								
S'1134	6,50	135	150,0	150,0	150,2	150,1	2854,1	1644,0	2854,4	1210,4	2,358	3,95	17,11	76,9
S'1231	7,00	140	150,3	150,3	150,4	150,3	2879,8	1662,2	2880,3	1218,1	2,364	3,08	17,28	82,2
S'1232	7,00	141	150,1	150,2	150,3	150,2	2879,1	1663,6	2879,5	1215,9	2,368	2,93	17,15	82,9
S'1233	7,00	137	150,3	150,3	150,6	150,4	2873,3	1658,9	2873,8	1214,9	2,365	3,04	17,25	82,4
S'1234	7,00	140	150,1	150,4	150,5	150,3	2870,0	1655,5	2870,3	1214,8	2,363	3,14	17,34	81,9
S'1331	7,50	135	150,4	150,5	150,5	150,5	2871,2	1655,7	2871,4	1215,7	2,362	2,56	17,75	85,6
S'1332	7,50	142	150,2	150,3	150,5	150,3	2862,0	1648,8	2862,2	1213,4	2,359	2,69	17,86	85,0
S'1333	7,50	140	150,2	150,6	150,8	150,5	2866,5	1651,2	2866,6	1215,4	2,358	2,70	17,87	84,9
S'1334	7,50	138	150,6	150,8	150,9	150,8	2862,0	1648,7	2862,2	1213,5	2,358	2,70	17,87	84,9

EK E: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Numunelerinin Hacimsel Analizi

Tablo E.1: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Numunelerinin Hacimsel Özellikleri

Numune Kodu	Bütüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doğru Yüze Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)
			1	2	3	Ortalama					
A1111	5,00	136	63,8	64,1	64,2	64,0	1238,6	724,0	1238,6	514,6	2,407
A1112	5,00	136	64,0	63,8	64,1	64,0	1229,8	716,9	1230,3	513,4	2,395
A1113	5,00	138	64,3	64,5	64,5	64,4	1245,1	726,4	1245,5	519,1	2,399
A1121	5,00	138	63,2	63,6	63,6	63,5	1224,7	714,5	1225,2	510,7	2,398
A1122	5,00	136	63,8	64,0	64,1	64,0	1232,7	720,2	1233,0	512,8	2,404
A1123	5,00	136	64,2	64,4	64,6	64,4	1237,0	720,5	1237,2	516,7	2,394
A1131	5,00	135	64,5	64,3	64,7	64,5	1239,8	722,3	1240,6	518,3	2,392
A1132	5,00	135	63,8	63,8	64,0	63,9	1234,4	722,1	1235,3	513,2	2,405
A1211	5,50	134	63,8	63,8	63,9	63,8	1243,5	729,2	1243,6	514,4	2,417
A1212	5,50	134	64,2	64,5	64,4	64,4	1251,0	732,5	1251,3	518,8	2,411
A1213	5,50	137	63,8	63,8	63,6	63,7	1237,4	725,6	1237,8	512,2	2,416
A1221	5,50	137	64,4	64,1	64,4	64,3	1249,1	733,5	1249,3	515,8	2,422
A1222	5,50	135	64,4	63,8	63,8	64,0	1234,6	722,4	1234,4	512,0	2,411
A1223	5,50	135	64,1	64,4	64,3	64,3	1244,6	729,2	1245,4	516,2	2,411
A1231	5,50	138	64,0	64,1	64,5	64,2	1249,5	734,4	1249,9	515,5	2,424
A1232	5,50	138	63,8	64,0	64,0	63,9	1240,6	727,8	1241,4	513,6	2,415
A1311	6,00	136	63,9	63,7	63,7	63,8	1249,5	735,8	1250,1	514,3	2,430
A1312	6,00	136	64,5	64,6	64,8	64,6	1264,8	744,9	1265,3	520,4	2,430
A1313	6,00	137	63,8	63,7	64,9	64,1	1250,3	735,8	1250,4	514,6	2,430
A1321	6,00	137	63,8	64,3	64,4	64,2	1255,4	739,4	1255,8	516,4	2,431
A1322	6,00	136	64,7	64,9	65,1	64,9	1270,4	747,0	1270,8	523,8	2,425
A1323	6,00	136	63,4	63,6	63,8	63,6	1242,6	730,5	1243,0	512,5	2,425
A1331	6,00	135	64,3	64,5	64,4	64,4	1261,8	742,7	1262,0	519,3	2,430
A1332	6,00	135	63,5	63,8	63,7	63,7	1249,3	736,2	1249,8	513,6	2,432
A2211	5,50	137	63,6	63,8	63,9	63,8	1233,5	723,5	1234,1	510,6	2,416
A2212	5,50	140	63,0	63,1	63,4	63,2	1225,7	719,1	1226,0	506,9	2,418
A2213	5,50	140	64,9	64,9	65,2	65,0	1252,9	732,7	1253,9	521,2	2,404
A2221	5,50	142	63,7	63,8	63,8	63,8	1237,3	725,2	1237,9	512,7	2,413
A2222	5,50	142	64,5	64,6	64,6	64,6	1243,9	726,5	1244,6	518,1	2,401
A2223	5,50	137	65,0	65,5	65,6	65,4	1267,9	742,8	1268,4	525,6	2,412
A2231	5,50	137	63,3	63,4	63,5	63,4	1227,9	717,5	1228,8	511,3	2,402
A2232	5,50	140	63,6	63,8	63,9	63,8	1231,7	719,9	1232,5	512,6	2,403
A2233	5,50	140	64,4	64,5	64,6	64,5	1252,5	734,2	1253,3	519,1	2,413
A3211	5,50	134	63,0	63,8	63,7	63,5	1227,3	714,7	1227,7	513,0	2,392
A3212	5,50	135	64,0	64,2	64,3	64,2	1242,7	724,7	1243,0	518,3	2,398
A3213	5,50	135	64,2	64,4	64,6	64,4	1238,6	719,9	1239,3	519,4	2,385
A3221	5,50	135	63,8	63,6	64,2	63,9	1232,2	715,8	1232,7	516,9	2,384
A3222	5,50	135	64,5	64,2	64,2	64,3	1241,0	723,3	1241,9	518,6	2,393
A3223	5,50	135	64,3	64,6	64,2	64,4	1249,9	727,7	1250,6	522,9	2,390
A3231	5,50	135	64,1	64,2	63,8	64,0	1248,7	729,0	1249,5	520,5	2,399
A3232	5,50	136	64,9	64,8	64,4	64,7	1252,7	728,9	1254,2	525,3	2,385
A3233	5,50	136	63,7	63,1	63,2	63,3	1233,3	719,0	1234,7	515,7	2,392
S1111	6,00	142	64,7	64,7	64,5	64,6	1206,4	690,6	1207,1	516,5	2,336
S1112	6,00	137	64,2	64,3	64,0	64,2	1199,3	686,7	1201,0	514,3	2,332
S1113	6,00	140	64,0	63,8	64,3	64,0	1200,8	689,1	1201,5	512,4	2,343

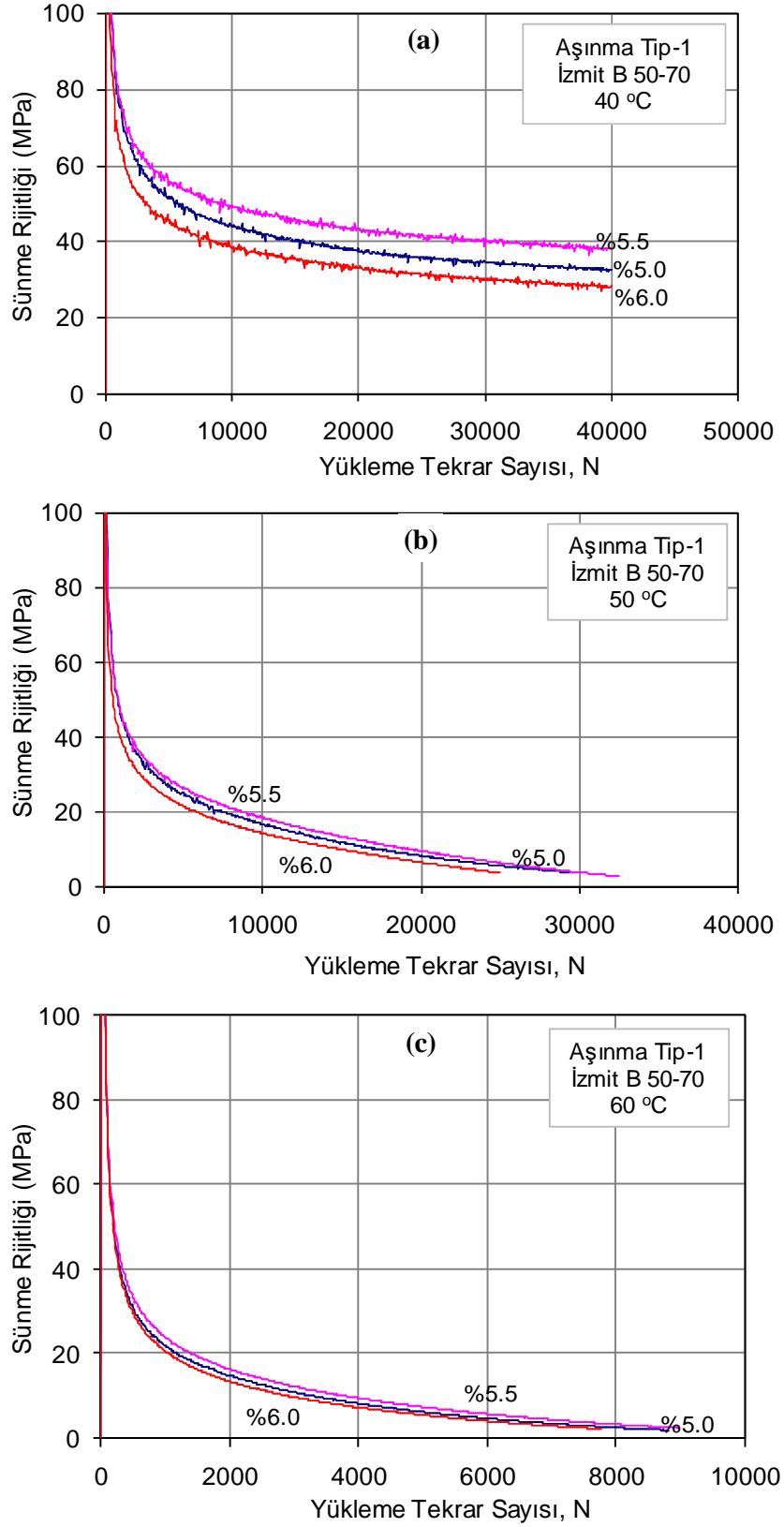
Tablo E.1: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Numunelerinin Hacimsel Özellikleri (Devamı)

Numune Kodu	Bütüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)
			1	2	3	Ortalama					
S1121	6,00	139	63,5	63,9	63,7	63,7	1186,5	678,5	1187,5	509,0	2,331
S1122	6,00	138	64,6	64,4	64,2	64,4	1199,8	687,6	1200,6	513,0	2,339
S1123	6,00	137	63,6	63,4	63,5	63,5	1174,9	672,9	1177,2	504,3	2,330
S1131	6,00	137	65,3	65,9	65,0	65,4	1219,9	699,6	1220,4	520,8	2,342
S1132	6,00	136	63,7	63,3	63,9	63,6	1171,0	669,5	1172,2	502,7	2,329
S1133	6,00	136	64,3	64,8	64,4	64,5	1201,2	687,6	1202,0	514,4	2,335
S1211	6,50	141	65,1	65,0	64,8	65,0	1220,5	701,8	1221,4	519,6	2,349
S1212	6,50	138	64,6	64,4	64,7	64,6	1210,3	695,6	1211,4	515,8	2,346
S1213	6,50	138	63,7	64,1	63,8	63,9	1204,3	695,2	1205,0	509,8	2,362
S1221	6,50	139	64,8	64,2	64,1	64,4	1214,5	697,6	1215,5	517,9	2,345
S1222	6,50	139	64,2	64,4	63,6	64,1	1208,3	696,2	1209,5	513,3	2,354
S1223	6,50	140	63,9	64,3	64,0	64,1	1200,7	690,9	1201,6	510,7	2,351
S1231	6,50	140	64,3	63,6	64,3	64,1	1203,2	691,8	1203,9	512,1	2,350
S1232	6,50	141	64,3	64,8	64,7	64,6	1202,6	691,4	1204,0	512,6	2,346
S1233	6,50	141	63,9	63,8	64,1	63,9	1196,3	689,1	1197,5	508,4	2,353
S1311	7,50	140	64,5	64,5	64,4	64,5	1217,7	701,0	1217,9	516,9	2,356
S1312	7,50	137	63,9	63,9	64,0	63,9	1213,7	699,1	1213,9	514,8	2,358
S1313	7,50	137	64,0	64,2	63,8	64,0	1218,1	702,2	1218,2	516,0	2,361
S1321	7,50	139	64,0	64,0	63,7	63,9	1216,6	701,9	1216,9	515,0	2,362
S1322	7,50	139	65,0	64,8	64,8	64,9	1230,7	708,2	1230,9	522,7	2,355
S1323	7,50	138	63,6	63,9	64,1	63,9	1212,2	699,9	1212,5	512,6	2,365
S1331	7,50	138	64,3	64,6	64,1	64,3	1216,6	701,0	1216,5	515,5	2,360
S1332	7,50	136	63,7	63,7	63,6	63,7	1202,8	692,4	1202,9	510,5	2,356
S1333	7,50	136	64,7	64,8	64,6	64,7	1225,9	707,2	1225,9	518,7	2,363
S2211	6,50	140	62,9	62,8	63,4	63,0	1187,9	684,3	1188,6	504,3	2,356
S2212	6,50	142	64,2	63,8	63,9	64,0	1198,1	685,3	1199,6	514,3	2,330
S2213	6,50	142	64,0	64,1	64,0	64,0	1205,0	692,8	1205,9	513,1	2,348
S2221	6,50	134	64,1	64,1	64,1	64,1	1197,4	688,4	1198,7	510,3	2,346
S2222	6,50	134	63,3	63,5	63,5	63,4	1194,6	688,3	1196,0	507,7	2,353
S2223	6,50	141	64,4	64,2	64,3	64,3	1204,2	692,3	1205,5	513,2	2,346
S2231	6,50	141	63,7	63,8	63,9	63,8	1187,8	680,6	1189,4	508,8	2,335
S2232	6,50	137	64,2	64,3	64,5	64,3	1208,1	692,8	1209,0	516,2	2,340
S2233	6,50	137	64,0	64,1	64,2	64,1	1204,8	692,0	1206,0	514,0	2,344
S3211	6,50	141	63,6	63,4	63,3	63,4	1195,3	687,7	1195,8	508,1	2,352
S3212	6,50	140	64,9	64,8	64,9	64,9	1214,4	697,7	1215,0	517,3	2,348
S3213	6,50	140	64,3	64,3	64,1	64,2	1201,1	689,1	1201,6	512,5	2,344
S3221	6,50	134	64,6	64,9	64,8	64,8	1211,5	694,7	1212,3	517,6	2,341
S3222	6,50	134	64,4	64,1	64,0	64,2	1200,8	691,0	1201,6	510,6	2,352
S3223	6,50	138	63,4	63,7	63,5	63,5	1192,8	684,2	1193,2	509,0	2,343
S3231	6,50	138	65,1	64,9	65,1	65,0	1216,0	695,8	1216,6	520,8	2,335
S3232	6,50	139	64,9	65,1	65,1	65,0	1224,2	703,9	1224,7	520,8	2,351
S3233	6,50	139	64,8	64,8	64,0	64,5	1189,3	680,8	1187,9	507,1	2,345
S4211	6,50	160	63,6	63,6	64,7	64,0	1229,9	711,7	1230,4	518,7	2,371
S4212	6,50	155	64,2	64,3	64,5	64,3	1232,0	713,0	1232,4	519,4	2,372
S4213	6,50	155	63,7	63,8	63,9	63,8	1218,9	706,0	1219,4	513,4	2,374
S4221	6,50	160	63,9	64,0	64,0	64,0	1218,3	704,7	1219,2	514,5	2,368
S4222	6,50	160	64,4	64,5	64,6	64,5	1233,2	714,8	1233,9	519,1	2,376
S4223	6,50	158	63,9	64,2	64,2	64,1	1227,2	711,0	1228,0	517,0	2,374

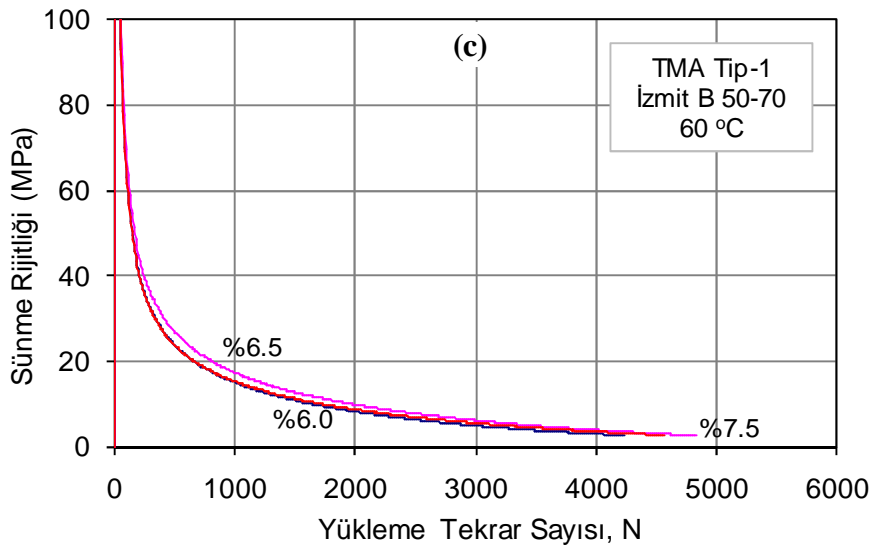
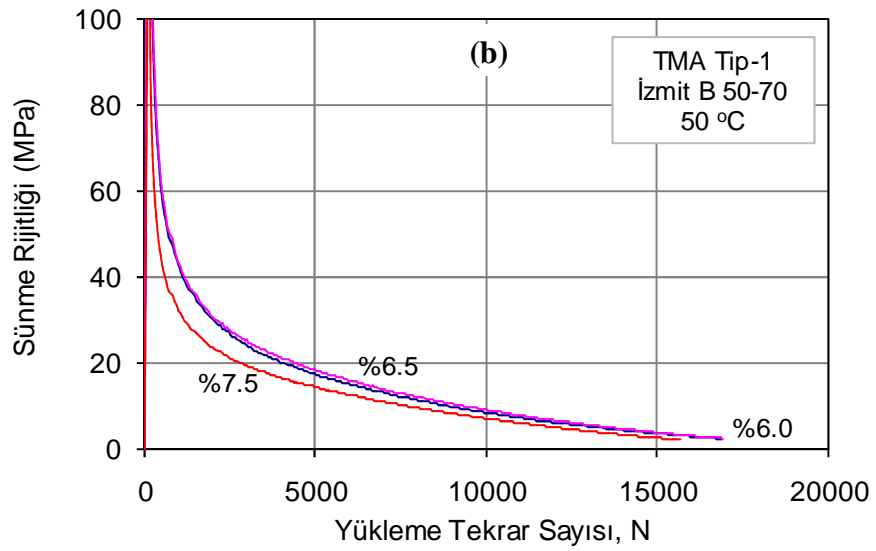
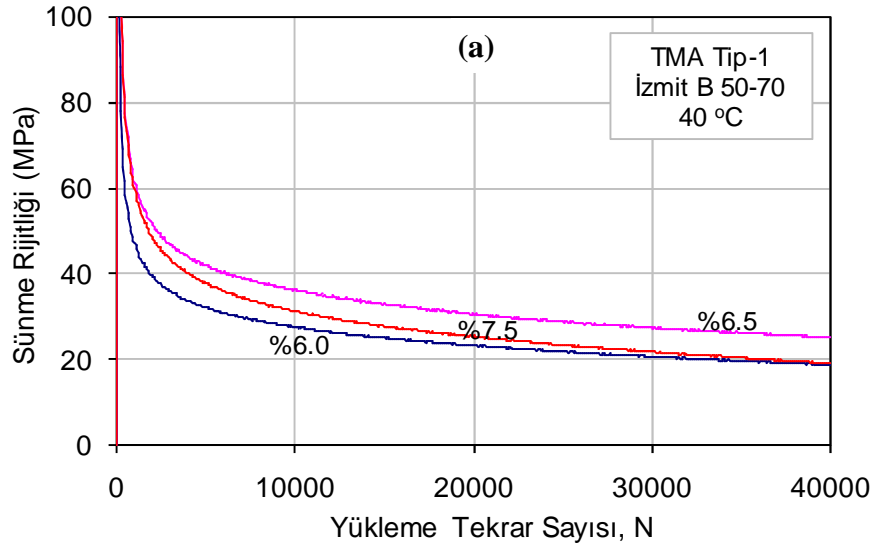
Tablo E.1: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Numunelerinin Hacimsel Özellikleri
(Devamı)

Numune Kodu	Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)	Biriket Yükseklikleri (mm)				Havada Ağırlığı (g)	Suda Ağırlığı (g)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı (g)	Hacim (cm ³)	Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)
			1	2	3	Ortalama					
S4231	6,50	158	64,1	64,3	64,4	64,3	1225,5	708,6	1226,1	517,5	2,368
S4232	6,50	154	64,3	64,5	64,5	64,4	1229,6	711,1	1229,9	518,8	2,370
S4233	6,50	154	63,7	63,8	64,0	63,8	1224,4	708,1	1224,9	516,8	2,369
S'1111	6,50	141	64,1	64,6	64,7	64,5	1214,8	700,5	1215,7	515,2	2,358
S'1112	6,50	140	64,5	64,6	64,6	64,6	1216,1	699,8	1216,9	517,1	2,352
S'1113	6,50	140	64,0	64,1	64,2	64,1	1204,2	691,2	1204,8	513,6	2,345
S'1121	6,50	142	64,2	64,3	64,4	64,3	1225,2	707,6	1225,5	517,9	2,366
S'1122	6,50	142	63,7	64,0	64,0	63,9	1205,1	692,6	1205,6	513,0	2,349
S'1123	6,50	139	64,4	64,5	64,7	64,5	1218,7	700,0	1219,5	519,5	2,346
S'1131	6,50	139	63,8	63,9	64,0	63,9	1206,1	694,3	1206,7	512,4	2,354
S'1132	6,50	140	63,6	63,6	63,9	63,7	1207,5	695,8	1208,2	512,4	2,357
S'1133	6,50	140	64,5	64,7	64,7	64,6	1216,4	699,4	1216,9	517,5	2,351
S'1211	7,00	140	63,7	63,7	64,0	63,8	1214,3	702,3	1215,0	512,7	2,368
S'1212	7,00	141	64,0	64,1	64,2	64,1	1218,5	704,5	1219,2	514,7	2,367
S'1213	7,00	141	64,0	64,0	64,0	64,0	1215,1	703,1	1215,8	512,7	2,370
S'1221	7,00	140	63,8	64,1	64,2	64,0	1217,2	703,9	1217,2	513,3	2,371
S'1222	7,00	140	63,2	63,2	63,4	63,3	1203,1	695,5	1203,7	508,2	2,367
S'1223	7,00	137	64,1	64,2	64,2	64,2	1218,3	704,8	1219,1	514,3	2,369
S'1231	7,00	137	64,2	64,2	64,5	64,3	1216,2	701,5	1216,9	515,4	2,360
S'1232	7,00	139	64,5	64,6	64,7	64,6	1223,8	706,6	1224,4	517,8	2,363
S'1233	7,00	139	63,6	63,8	63,9	63,8	1209,7	699,6	1210,1	510,5	2,370
S'1311	7,50	140	63,7	63,8	63,9	63,8	1213,5	701,1	1213,7	512,6	2,367
S'1312	7,50	141	64,1	64,2	64,2	64,2	1219,2	704,6	1219,5	514,9	2,368
S'1313	7,50	141	64,1	64,1	64,1	64,1	1214,8	701,1	1215,2	514,1	2,363
S'1321	7,50	138	63,7	63,9	64,1	63,9	1219,5	705,2	1219,9	514,7	2,369
S'1322	7,50	138	64,2	64,3	64,5	64,3	1227,9	709,6	1228,1	518,5	2,368
S'1323	7,50	139	64,5	64,7	64,7	64,6	1234,1	714,5	1234,6	520,1	2,373
S'1331	7,50	139	63,7	63,8	64,0	63,8	1212,9	700,7	1213,1	512,4	2,367
S'1332	7,50	140	64,2	64,4	64,8	64,5	1217,8	703,9	1218,1	514,2	2,368
S'1333	7,50	140	63,6	64,1	63,6	63,8	1216,6	704,0	1216,9	512,9	2,372

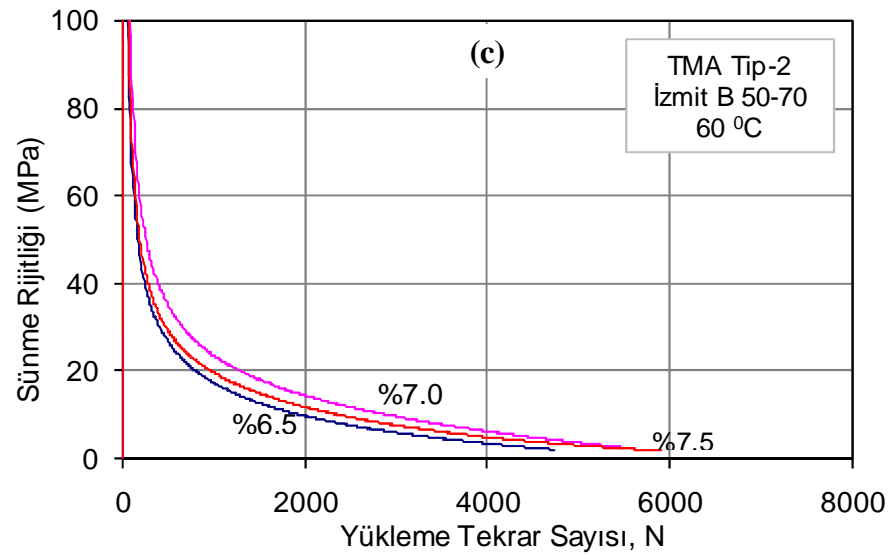
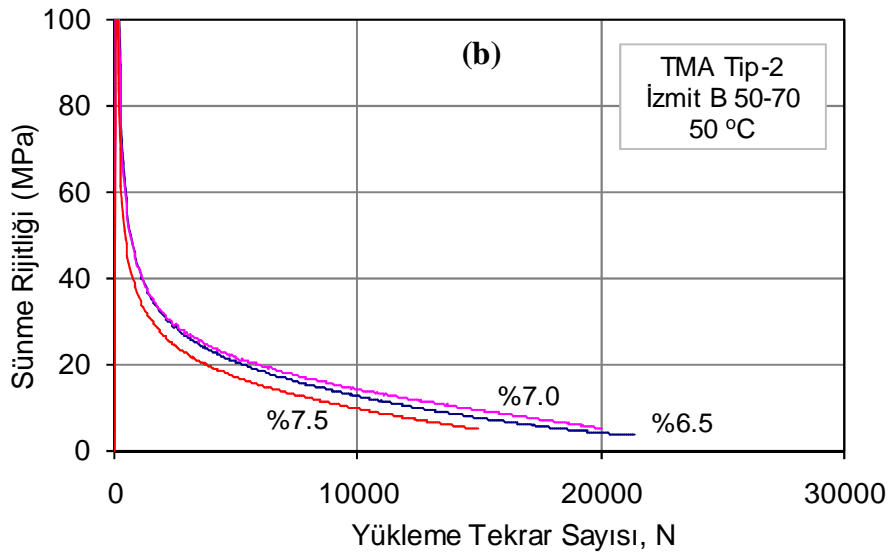
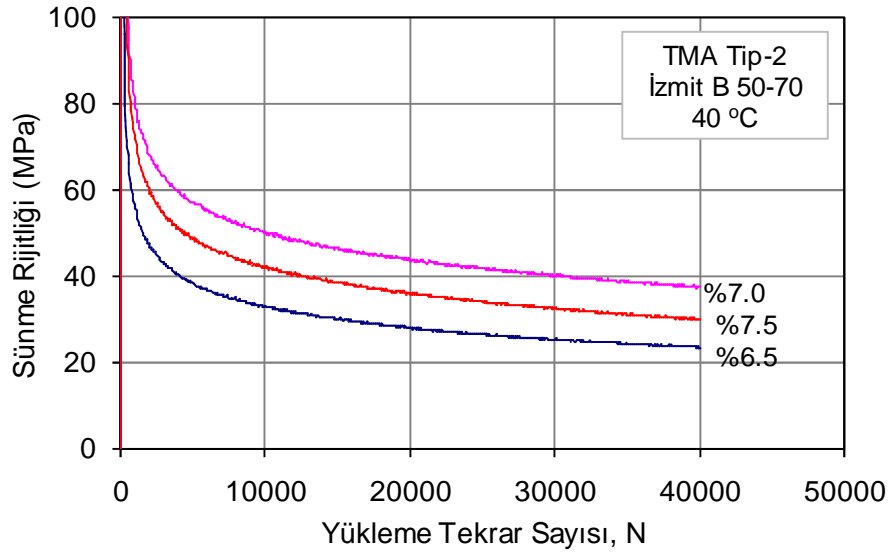
EK F: Tek Eksenli Tekrarlı Sünme Deneyi Sünme Rijitliği Grafikleri



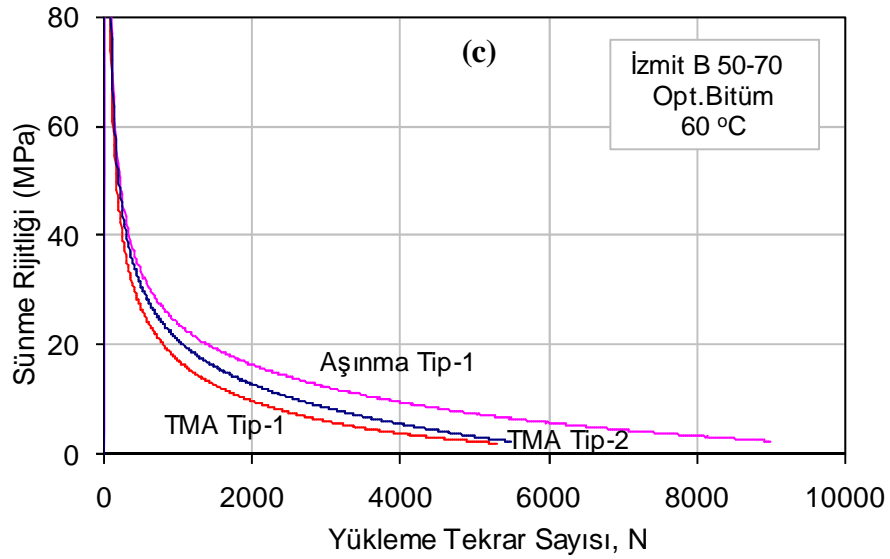
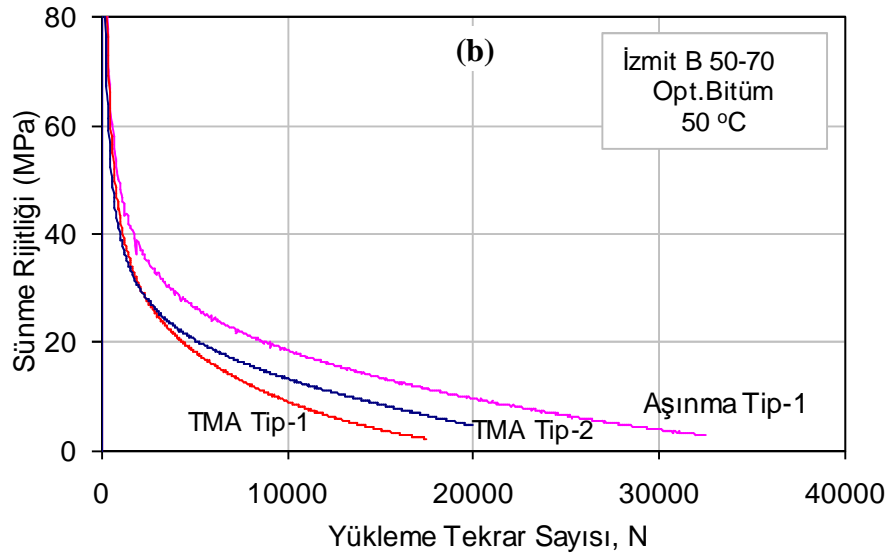
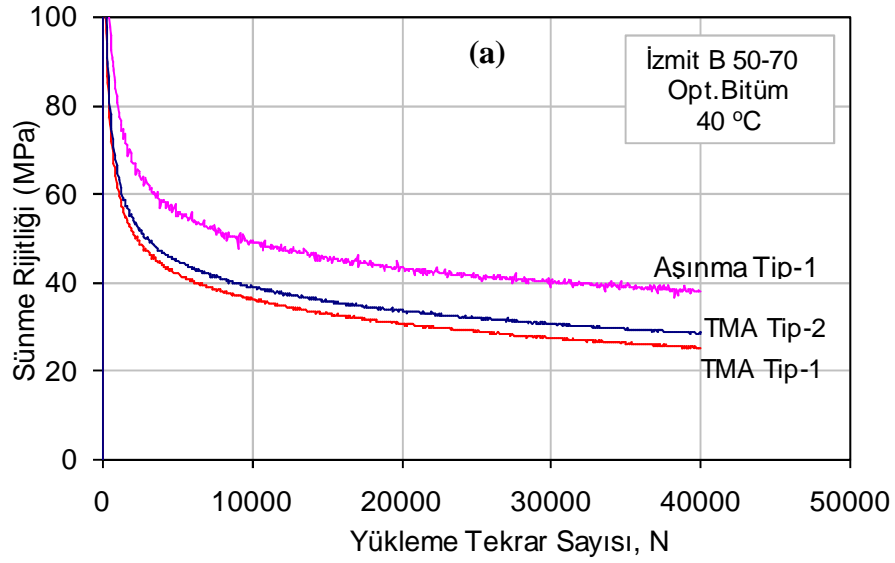
Şekil F.1: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Sünme Rijitliği Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



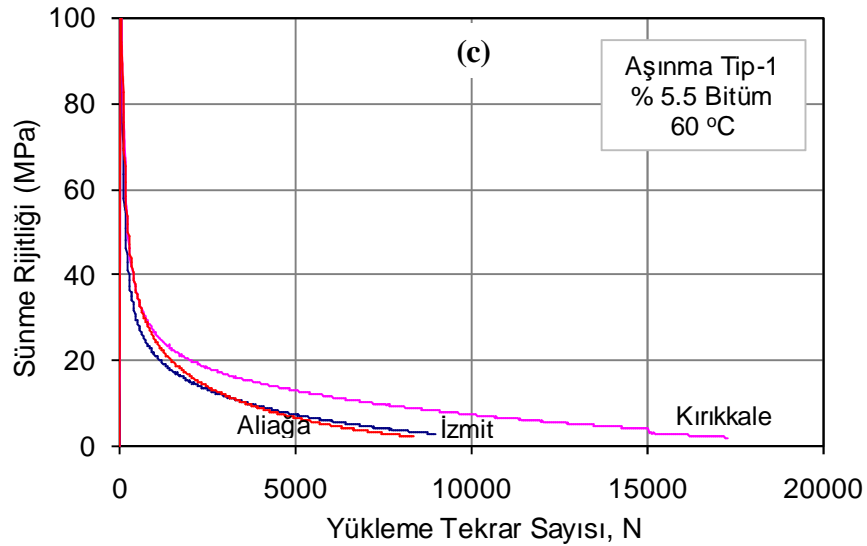
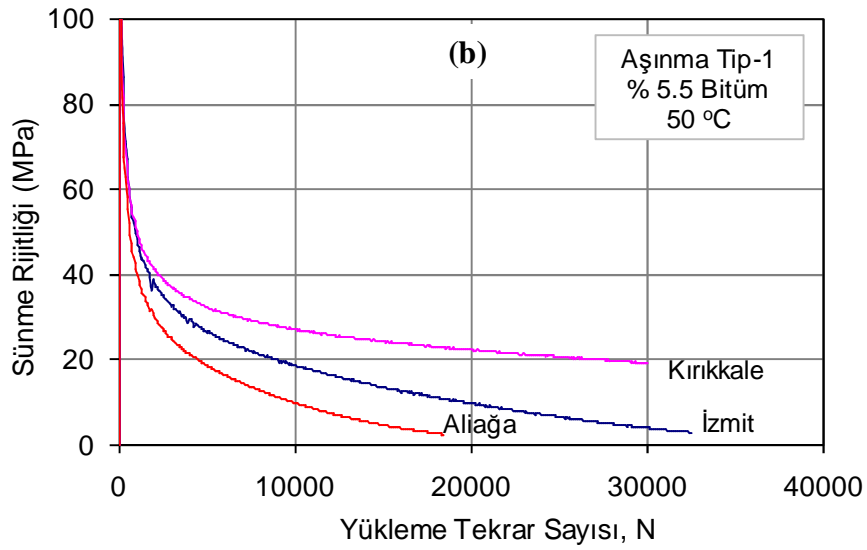
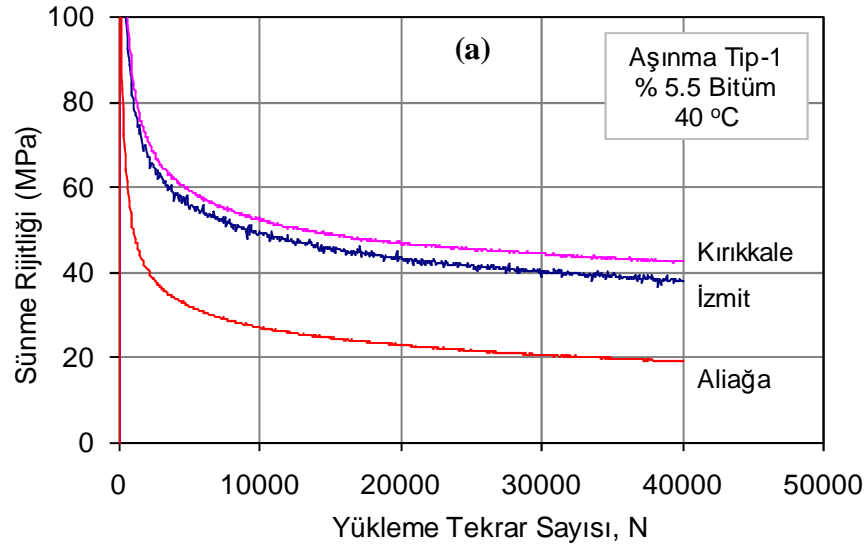
Şekil F.2: TMA Tip-1’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Sünme Rijitliği Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



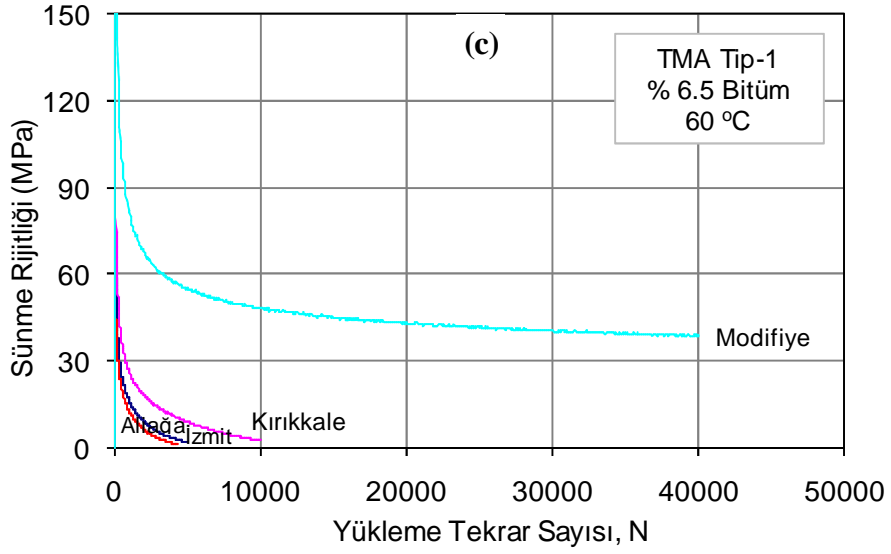
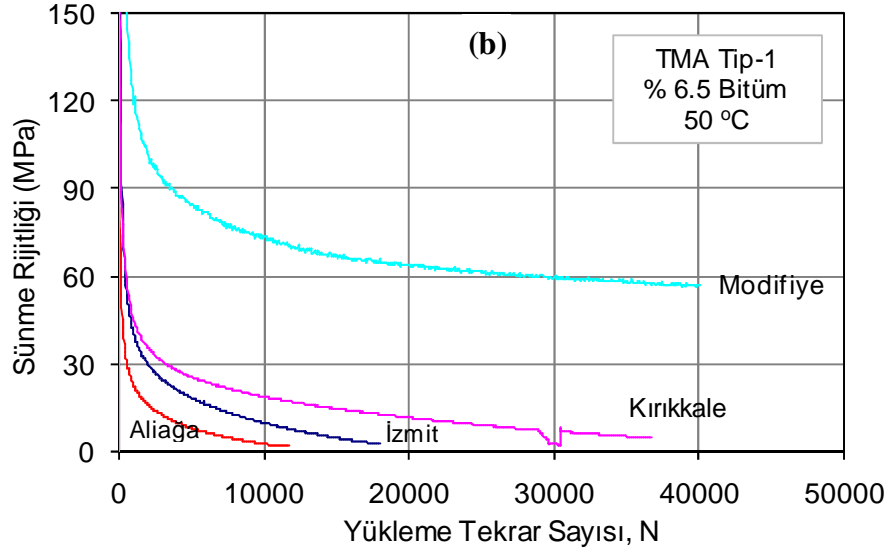
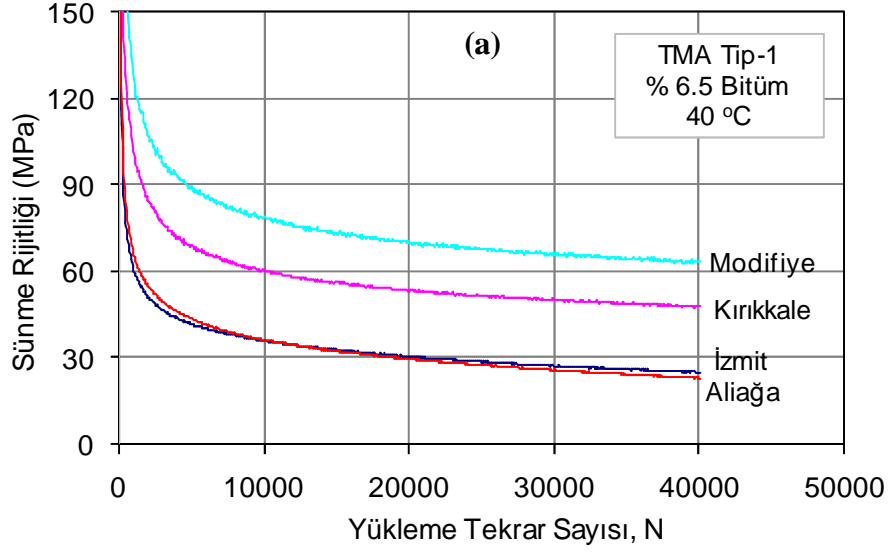
Şekil F.3: TMA Tip-2’de Kullanılan Bitüm Yüzdelerinin Farklı Sıcaklıklardaki Sünme Rijitliği Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



Şekil F.4: Karışım Tiplerine ait Farklı Sıcaklıklardaki Sünme Rijitliği Grafikleri:
(a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



Şekil F.5: Aşınma Tip-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıktaki Sünme Rijitliği Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C



Şekil F.6: TMA Tıp-1’de Kullanılan Bitümlü Bağlayıcıların Farklı Sıcaklıktaki Sünme Rijitliği Grafikleri: (a) 40 °C (b) 50 °C (c) 60 °C

ÖZGEÇMİŞ

Altan ÇETİN, 1974 yılında Bartın'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bartın'da tamamladı. 1991 yılında, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladığı lisans öğrenimini 1995 yılında başarıyla tamamladı. 1995–1997 yılları arasında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisansını tamamladı. 1996 yılında Anadolu Üniversitesinde başladığı görevine halen devam etmektedir.