

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİNİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN DÜŞÜK SICAKLIK VE ELASTİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Alaaddin GEÇKİL

(101115115)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Ulaştırma

Danışman: Doç. Dr. Baha Vural KÖK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23.01.2013

OCAK-2013

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİNİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN DÜŞÜK SICAKLIK VE ELASTİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Alaaddin GEÇKİL

(101115115)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23.01.2013
Tezin Savunulduğu Tarih :15.02.2013**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü)

Diğer jüri Üyeleri : Prof.Dr.Necati KULOĞLU (F.Ü)

Doç.Dr.Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)

OCAK-2013

ÖNSÖZ

Çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın her aşamasında bilgi, görüş ve desteğini esirgemeyen, aynı zamanda karşılaştığım her sorunla başa çıkabilme yeteneği kazandıran, maddi ve manevi her türlü desteklerini benden esirgemeyen değerli danışman hocam, Doç.Dr.Baha Vural KÖK' e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, çalışmada tecrübe ve önerilerinden yararlandığım sayın Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ'a ; maddi ve manevi her türlü desteklerini benden esirgemeyen abim Yrd.Doç.Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve değerli arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Alaaddin GEÇKİL

2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LISTESİ.....	XIV
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU ULAŞIMI VE KARAYOLLARININ YAPISI.....	2
2.1. Karayolu Alt Yapısı	2
2.2. Karayolu Üst Yapısı.....	3
2.2.1. Esnek Üstyapılar	4
3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR ve ÖZELİKLERİ.....	7
3.1. Agregalar	7
3.2. Bitümler	10
3.2.1. Bitümlerin yaşlanma nedenleri.....	12
3.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar	13
3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Fiziksel Ve Mekanik Özellikler	14
3.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabİlİtesi	15
3.4.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijİtliği	16

3.4.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)	17
3.4.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti	18
3.4.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)	19
3.4.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)	19
3.4.8. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci	20
3.4.9. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği	21
3.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar	21
3.5.1. Deformasyonlar	23
3.5.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu	24
3.5.1.2. Oturmalar ve Çökmeler	25
3.5.1.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar.....	26
3.5.2. Çatlaklar	26
3.5.2.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)	27
3.5.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları	28
3.5.2.3. Diğer Çatlaklar.....	30
3.5.4. Ayrışmalar	31
3.5.4.1. Soyulmalar	31
3.5.4.2. Sökülmeler	31
4. BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KULLANILAN KATKILAR.....	33
4.1. Bitümlü Karışımlarda Katkı Maddelerinin Rolü	35
4.2. Bitüm ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilme Sebepleri	37
4.3. Modifiye Yöntemleri	40
4.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	40

4.4.1 Filler	45
4.4.2 Ekstenderler (Genleştiriciler):	46
4.4.3 Kauçuklar	46
4.4.4 Plastikler	52
4.4.5. Kombinasyonlar	54
4.4.6. Fiberler.....	54
4.4.7. Oksidanlar	55
4.4.8. Hidrokarbonlar	55
4.4.9. Yol Uygulamalarında Kullanılan Polimerler	56
4.4.9.1 Termoplastikler	56
4.4.9.2. Termosetler	57
4.4.9.3. Elastomerler.....	57
4.4.9.4. Fiberler.....	58
5. ATIK LASTİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	59
5.1. Atık Lastikler.....	60
5.2. Kauçuk Ve Lastik Geri Kazanımı	61
5.3. Atık Lastikleri Parçalama Yöntemleri.....	67
5.3.1. Mekanik Parçalama Yöntemi	68
5.3.2. Nitrojenle Parçalama Yöntemi	69
5.4. Atık Lastiklerin Bitümlü Karışımlarda Kullanımı.....	69
6. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER.....	74
6.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler.....	74
6.1.1. Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri	74

6.1.1.1. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT).....	74
6.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)	76
6.1.2. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5).....	79
6.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402-87)	84
6.1.4. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1).....	85
6.1.5. Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426).....	89
6.1.6. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120 EN 1427)	90
6.2. Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerine Uygulanan Deneyler	91
6.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	91
6.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	92
6.2.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	94
6.2.4. Tokluk İndeksi Deneyi.....	96
6.2.5. Yarım Daire Eğilme Deneyi	97
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	100
7.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi	100
7.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması	103
7.3. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları.....	104
7.3.1. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları	104
7.3.2. Eğilme Kirişi Deney Sonuçları.....	109
7.4. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	114
7.4.1 Optimum Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi	114
7.4.2 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları.....	121
7.4.3 İndirek Çekme Yorulma Deney Sonuçları	124

7.4.4 Tokluk İndeksi Deney Sonuçları	126
7.4.5 Yarım Daire Eğilme Deney Sonuçları	127
8. SONUÇ.....	129
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ.....	139

ÖZET

Bu çalışmada öğütölmüş atık araç lastiğı ile modifiye edilen bitüm ve bitümlü karışımların performansı stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bitüm ve bitümlü karışımların performansı ile karşılaştırılmıştır. Modifiye bitüm ve karışımlar, dinamik kesme reometresi (DSR), kiriş eğilme deneyi (BBR) gibi reolojik testler ve indirekt çekme rijitlik modöölü , yorulma ,yarım daire eğilme ve tokluk indeksi gibi sıcak karışım performans testleri ile değeriendirilmiştir. Deneysel çalışmaları, SBS modifikasyonu ile elde edilen performansa ulaşmak için atık araç lastiğinin SBS oranında iki kat daha fazla kullanılması gerektiğini göstermiştir. Yüksek oranda öğütölmüş araç lastiğı modifikasyonu geri dönen şekil değıştirmeler açısından SBS modifikasyonuna göre daha elastik davranış sergilemiştir. Çatlak başlangıcına karşı direnç öğütölmüş araç lastiğı modifiyeli karışımlarda katkı oranını artması ile artarken çatlak ilerleyişine karşı direnç yorulma ve yarım daire eğilme deneylerine göre aşırı derecede azalmaktadır.

Anahtar kelimeler: Öğütölmüş Araç Lastiğı , Stiren-Butadien-Stiren, Reolojik Özellikler, Performans Testleri, Çatlak İlerleyişi

SUMMARY

The Effect of Crumb Waste Tires on Low Temperature and Elastic Properties of Bitumen and Bituminous Hot Mixtures

In this study, performances of bitumen and asphalt mixtures modified by crumbrubber were compared to those modified by styrene-butadiene-styrene (SBS). The resultant mixtures were evaluated for their rheological and mechanical performances by different experimental techniques, such as rheological bitumen tests i.e., dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR), and hot mixture performance tests i.e., indirect tensile stiffness modulus, fatigue, semi-circular bending and toughness index. The experimental studies show that it is necessary to use two times more crumb rubber than SBS in order to reach the same performance attained by SBS. Crumb-rubber modification at high additive content exhibits higher elastic response, i.e., recoverable strain, than SBS modified mixture does. While the resistance to crack initiation of crumb-rubber modified mixtures increases with the increasing additive content, the resistance to the crack propagation decreases dramatically according to fatigue and semi-circular bending tests.

Keywords: Crumb rubber, Styrene-butadiene-styrene, Rheological Properties, Performance Tests, Crack Propagation

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Tipik karayolu en kesiti	3
Şekil 2.2. Tipik esnek üstyapı enkesiti	4
Şekil 3.1. Asfaltın Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması	11
Şekil 3.2. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği	17
Şekil 3.3. Karışımların Sıcaklık, Gerilme ve Yorulma Ömrü İlişkisi	19
Şekil 3.4. Kaplama Pürüzlülüğü	20
Şekil 3.5. Farklı Dingil Yüklerinin Kaplamada Oluşturduğu Deformasyon	22
Şekil 3.6. Üstyapı Performans Eğrisi ve Rehabilitasyon Gösterimi	23
Şekil 3.7. Zayıf Bitümlü Tabakada Tekerlek İzi Oluşumu	24
Şekil 3.8. Zayıf Alt Tabakalarda Tekerlek İzi Oluşumu	25
Şekil 3.9. Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b)	27
Şekil 3.10. Yorulma Çatlaklarının Dereceleri	28
Şekil 3.11. Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları	29
Şekil 3.12. Düşük Sıcaklık Çatlağının Büyümesi	29
Şekil 4.1 ideal bir modifiyerle sağlanabilen, karışımın sertliğinde oluşan değişimler.....	35
Şekil 4.2. Statik yüklemede viskoelastik davranış	36
Şekil 4.3. Hareketli tekerlek yükü altında viskoelastik davranış	36
Şekil 5.1. Araç Lastiklerinin Yapısı	61
Şekil 5.2. Lastiğin mekanik olarak parçalanması	68

Şekil 6.1. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT)	75
Şekil 6.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	77
Şekil 6.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Çalışma Şekli	80
Şekil 6.4. Viskoelastik Davranış	81
Şekil 6.5. Viskoz ve Elastik Malzemelerde Gerilme- Deformasyon İlişkisi	82
Şekil 6.6. Viskoelastik Malzemelerde Gerilme-Deformasyon İlişkisi	83
Şekil 6.7. Brookfield DV-III Ultra Dönel Viskozimetresi	85
Şekil 6.8. Kiriş Eğme Reometresinin (BBR) Şematik Görünüşü	86
Şekil 6.9. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti	87
Şekil 6.10. Defleksiyonun (δ) Grafikle Belirlenmesi	88
Şekil 6.11. Sünme Oranı (m-değer) Değerinin Grafikle Belirlenmesi	89
Şekil 6.12 Penetrasyon deney cihazı	90
Şekil 6.13. Yumuşama noktası deney cihazı.....	91
Şekil 6.14. Marshall stabilite ve akma aleti	92
Şekil 6.15. ITSM deney düzeneği	93
Şekil 6.16. Yorulma deney düzeneği.....	96
Şekil 6.17. Yarım daire eğilme deney düzeneği.....	98
Şekil 6.18. Numuneye çentik açılması	98
Şekil 7.1. Karıştırma milleri ve etkileri	103
Şekil 7.2. Çalışmada kullanılan karıştırma mili	103
Şekil 7.3. Modifiye bitüm karıştırma cihazı.....	104
Şekil 7.4. Tekerlek izi parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	105
Şekil 7.5 $G^*/\sin\delta$ - faz açısı değişimi.....	106

Şekil 7.6 $G^*/\sin\delta$ indislerinin katkı oranı ile değişimi	106
Şekil 7.7 Sünme rijitliklerinin sıcaklıkla değişimi	112
Şekil 7.8 Sünme rijitliklerinin sıcaklıkla değişimi	112
Şekil 7.9 Sünme rijitliğinin sünme oranına oranın (λ) katkı içeriği ile değişimi	113
Şekil 7.10 Sünme rijitliğinin sünme oranına oranın (λ) katkı içeriği ile değişimi	113
Şekil 7.11. Karışımların optimum bitüm içerikleri	115
Şekil 7.12. Karışımların pratik özgül ağırlıkları	115
Şekil 7.13. Karışımların boşluk oranları	116
Şekil 7.14. Karışımların boşluk oranları	116
Şekil 7.15. Karışımların boşluk oranları	117
Şekil 7.16. B 160/220 + % 10 CR modifiye bitüm ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi	119
Şekil 7.17. B 160/220 + % 10 CR bitüm ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi	119
Şekil 7.18. B 160/220 + % 10 CR bitüm ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi	120
Şekil 7.19. B 160/220 + % 10 CR bitüm ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi	120
Şekil 7.20. B 160/220 + % 10 CR bitüm ile hazırlanan numunelerin G_{mb} - % bitüm ilişkisi	121
Şekil 7.21 Rijitlik modülü değerlerinin katkı oranı ile değişimi	122
Şekil 7.22 Gerilme – zaman ilişkisi	123
Şekil 7.23 Yük-şekil değiştirme ilişkisi	124
Şekil 7.24 Yük tekrarı ve deformasyon ilişkisi (SBS)	125

Şekil 7.25 Yük tekrarı ve deformasyon ilişkisi (CR)	126
Şekil 7.26 Tokluk indeksi değerlerinin katkı oranı ile değişimi	127
Şekil 7.27 Kırılma toklukları ve kırılma enerjilerinin katkı oranı ile değişimi	128
Şekil 7.28 Kırılma toklukları ve kırılma enerjilerinin katkı oranı ile değişimi	128

TABLÖLAR LISTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Agregalara uygulanan deneyler	10
Tablo 4.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	41
Tablo 4.2. Bitüm modifikasyon tipleri.....	42
Tablo 4.3. Bazı başlıca katkı malzemeleri	43
Tablo 4.4. Değişmiş sonuç özellikleri ile bazı yaygın kullanılan modifiyerler arasında ilişki	44
Tablo 4.5. Üstyapı problemlerine karşı üstyapının iyileştirilmesi için kullanılan modifiyerler	44
Tablo 5.1. Araç lastiği üretiminde kullanılan tipik malzemeler	61
Tablo 5.2. Bazı ülkelerde kullanılmış araç lastiklerinin yönetimi	63
Tablo 6.1. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler	75
Tablo 6.2. Bağlayıcı sınıfına göre uygulanacak PAV deney sıcaklıkları	77
Tablo 6.3. Superpave bağlayıcı performans deneyleri ve kullanılacak numuneler	78
Tablo 6.4. Superpave bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları	79
Tablo 6.5. Hedeflenen Kayma Gerilmesi ve Deformasyon Değerleri	84
Tablo 7.1. Bağlayıcının özellikleri.....	101
Tablo 7.2. Atık lastik elementel analizi	101
Tablo 7.3. Agreganın fiziksel özellikleri	102
Tablo 7.4. Agregada gradasyonu	102
Tablo 7.5 DSR test sonuçları	108
Tablo 7.6 BBR test sonuçları	110

Tablo 7.7. Karışımların hacimsel ve fiziksel özellikleri 114

Tablo 7.8. B160/220 + %10 CR modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar 118

SEMBOLLER LİSTESİ

BSK	: Bitümlü sıcak karışım
SBS	: Stiren - Butadiyen - Stiren
KGM	: Karayolları genel müdürlüğü
PG	: Performans seviyesi
DSR	: Dinamik kesme reometresi
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kaybı
RV	: Dönel viskozimetre
RTFOT	: Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
BBR	: Kiriş Eğme Reometresi
TS EN	: Türk Standartları – Euro Norm
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ITSM	: İndirek çekme rijitlik modülü
TI	: Tokluk İndeksi
AC	: Asfalt Çimentosu
ITS	: Endirekt kopma dayanımı
PI	: Penetrasyon indeksi
KSÖİK	: Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu
σ	: Gerilme
ε	: Şekil değiştirme
N_f	: Yorulma çatlağı meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı
K ve k	: Bitümlü karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar
E.F	: Taşıt eşdeğerlik faktörü
Li	: Dingil yükü
I	: Taşıtın dingil sayısı
A	: Yol üstyapısının servis yeteneğine göre değişen katsayı
M₁	: Bitümün yaşlanmadan önceki ağırlığı
M₂	: Bitümün yaşlanmadan sonraki ağırlığı
Ω	: Frekans
F	: 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekans
δ	: Faz açısı
G*	: Kompleks kayma modülü
S	: Sünme sertliği
m-değer	: Sünme oranı
c	: Stabilitate düzeltme katsayısı
S_m	: İndirekt çekme rijitlik modülü
F	: Maksimum dikey yük
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
L	: Ortalama numune yüksekliği
R	: Poisson oranı
k₁ , k₂	: Malzeme karakteristikleri
W	: Numunenin yüksekliği
ΔW	: Maksimum yük sırasındaki deformasyon
D	: Numunenin çapını
t	: Numunenin kalınlığı
K_{IC}	: Kırılma tokluğu
a	: Çentik yüksekliği
$f(\frac{a}{W})$	: Numunenin geometrik faktörü
W_{kuru}	: Havadaki kuru ağırlıkları

W_{suda}	:Sudaki ağırlıkları
W_{doygun}	:Havadaki doymun ağırlıkları
G_{mm}	:Numunelerin teorik özgül ağırlıkları
VFA	:Asfaltla dolu boşluk oranları
Vh	:Boşluk oranları
VMA	:Agregalar arasındaki boşluk oranları

1. GİRİŞ

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) özelliklerini iyileştirerek üstyapının performansını arttırmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleri bitümlü bağlayıcıyla karıştırılabildiği gibi doğrudan karışıma da eklenebilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar, Bitümlü Sıcak Karışımlarda ağırlıkça % 5–7 gibi düşük bir oranında kullanılmasına rağmen karışım performansı üzerinde çok büyük etkiye sahiptir. Bu sebeple modifikasyon üzerine yapılan çalışmaların çoğunda bitüm modifiye edilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) yüksek sıcaklık ve uzun yükleme sürelerinde viskoz bir davranış sergilediğinden kalıcı deformasyonlara karşı direnci düşük olmakta ve BSK’larda gerek teknik gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen tekerlek izinde oturma şeklinde bozulma meydana gelmektedir. Düşük ısılarda ise kırılgan bir davranış sergileyerek trafik yüklerinden gelen gerilmeleri sönümleyememekte ve çatlaklar oluşmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklıkta daha fazla esnek ve yüksek sıcaklıklarda daha stabil bir davranışa sahip olabilmesi için çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bitüme eklenen katkı malzemeleri içerisinde en fazla polimer grubu malzemeler kullanılmaktadır [Lu ve Isacsson, 2001]. Yapılan çeşitli çalışmalarda polimer kökenli polietilen (PE), polipropilen (PP), poli vinil klorid (PVC), polistiren (PS), stiren-etilen-butadien-stiren (SEBS), etilen vinil asetat (EVA) ve stiren-butadien-stiren (SBS) gibi termoplastik malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları belirlenmiştir [Whiteoak ve Read.,2003; Birliker,1998].

Ancak kullanılan katkı malzemeleri yurtdışı kaynaklı ve çok pahalı katkılardır. Katkının sağlayacağı faydanın yanında getirdiği ek maliyetler alternatif katkı arayışını her zaman gündemde tutmaktadır. Bu çalışmada polimer tipi özellikle SBS katkısına göre oldukça düşük maliyetli olan öğütülmüş araç lastiğinin, bitümlü sıcak karışımlardaki kullanılabilirliği, bitümün ve bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklık özellikleri bakımından incelenerek SBS modifikasyonunun performansı ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli oranlardaki SBS modifikasyonu ile benzer performans sergileyecek öğütülmüş araç lastiği oranları belirlenmiştir. Çalışmanın amacı SBS modifikasyonunun tamamının yada belirli bir oranının öğütülmüş araç lastiği ile ikame edilip edilemeyeceğinin araştırılmasıdır.

2. KARAYOLU ULAŞIMI VE KARAYOLLARININ YAPISI

Canlıların veya eşyaların bir yerden başka bir yere ekonomik, hızlı ve güvenli olarak nakledilmesine ulaşım denir. [Bek, 2004] Bir ülkenin kalkınmasında ve ilerlemesinde önemli bir yere sahip olan ulaştırma sistemleri: karayolu, deniz yolu, hava yolu ve demir yolu ve boru hatları olmak üzere beş dalda sınıflandırılabilir. Karayolu ulaştırmasının, ülkemizde ve tüm dünyada ulaşım talebinin karşılanmasında önemli yeri vardır. Yük ve yolcu taşımalarının yaklaşık %95'inin karayolu ile yapıldığı ülkemizde, 2011 Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre 64.865 km karayolu ağı bulunmaktadır [URL-1, 2011] Günümüzde hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınmayla beraber, yaşam standartlarının yükselmesi ülkelerdeki ulaşım talebini arttırmıştır. Bu artış bir yandan mevcut ulaştırma yapılarının bakım ve onarım giderlerini düşürmeye yönelik çalışmaları, diğer yandan da yeni ve en ekonomik ulaştırma sistemlerinin hayata geçirilebilmesi yönündeki çalışmaların yapılmasını zorunlu hale getirmiştir.

2.1. Karayolu Alt Yapısı

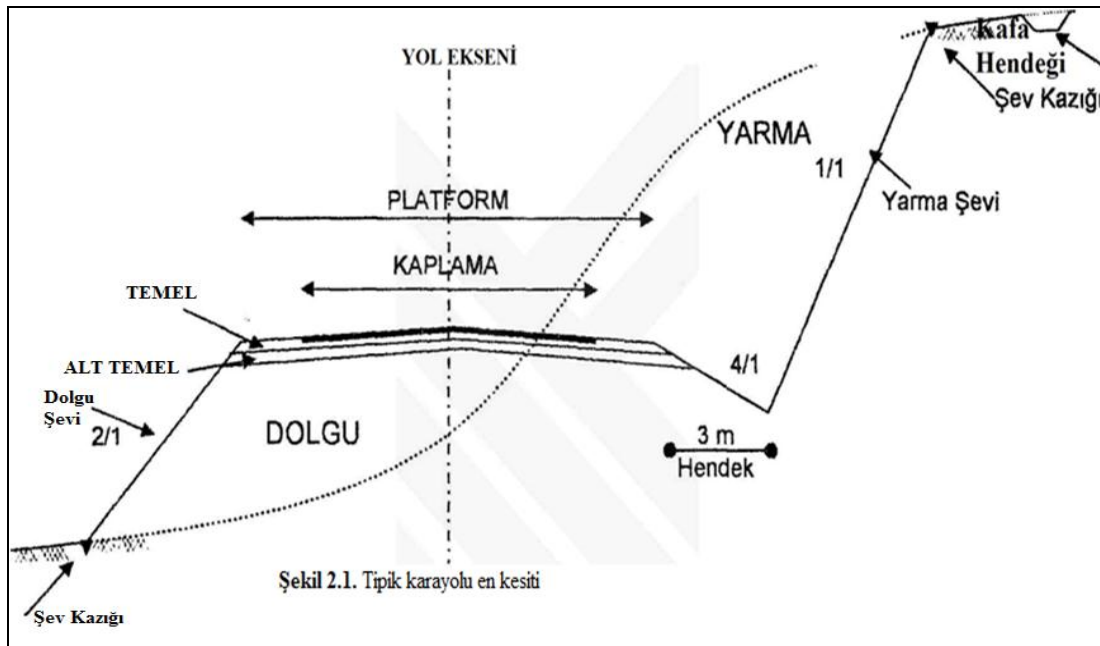
Toprak işleri sonunda, yolun projesinde belirlenen kot ve en kesit şekline getirilmiş durumuna altyapı adı verilir. Altyapı; yolun dolgu olacak kesimlerinde dışarıdan getirilen toprak ile oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zeminden oluşur. Menfez, drenaj sistemleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı kapsamına girer. Yolun esas taşıyıcı bölümü altyapıdır. Fakat yolun taşıyıcılık görevini iyi şekilde yapabilmesi için üzerine başka tabakaların da inşaa edilmesi gereklidir [URL-1, 2011; Agar vd.,1998; Yıldırım,Şiş, 2001].

Yol altyapısının başlıca görevleri: üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yaymak, az da olsa yolu dış etkilere korumak ve düzgün bir yüzey elde etmektir. Altyapının bu görevleri yerine getirebilmesi için; trafik yüklerine, don ve su etkilerine karşı dayanıklı bir şekilde inşaa edilmesi gerekir. Altyapıyı meydana getirirken; sağlam olmayan çürük zemin ve bitkisel toprak kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Bu nedenle

alt yapıyı oluşturacak olan zeminin, özelliklerinin çok iyi etüt edilerek belirlenmesi gerekmektedir [Erel, 1978].

2.2. Karayolu Üst Yapısı

Yol üstyapısı, trafik yüklerini taşıyan ve azaltarak altyapıya aktaran tabakalı bir yapıya sahiptir. Üstyapılar tabakalarında kullanılan malzemelerin özelliklerine göre genel olarak rijit ve esnek olmak üzere ikiye ayrılırlar [Orhan,2006]. Bu adlandırmalar kaplama tabakasının cinsine göre yapılmaktadır. Yol üst yapısı, alt yapı üzerine inşaa olunan, alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. [Erel, 1978]. Her türlü oto korkuluk yapımı, düşey ve yatay işaretlemeler de karayolu üst yapı kapsamına girmektedir [URL-1,2011]. Karayolu yapısına ait tipik bir en kesit Şekil 2.1' de verilmiştir.

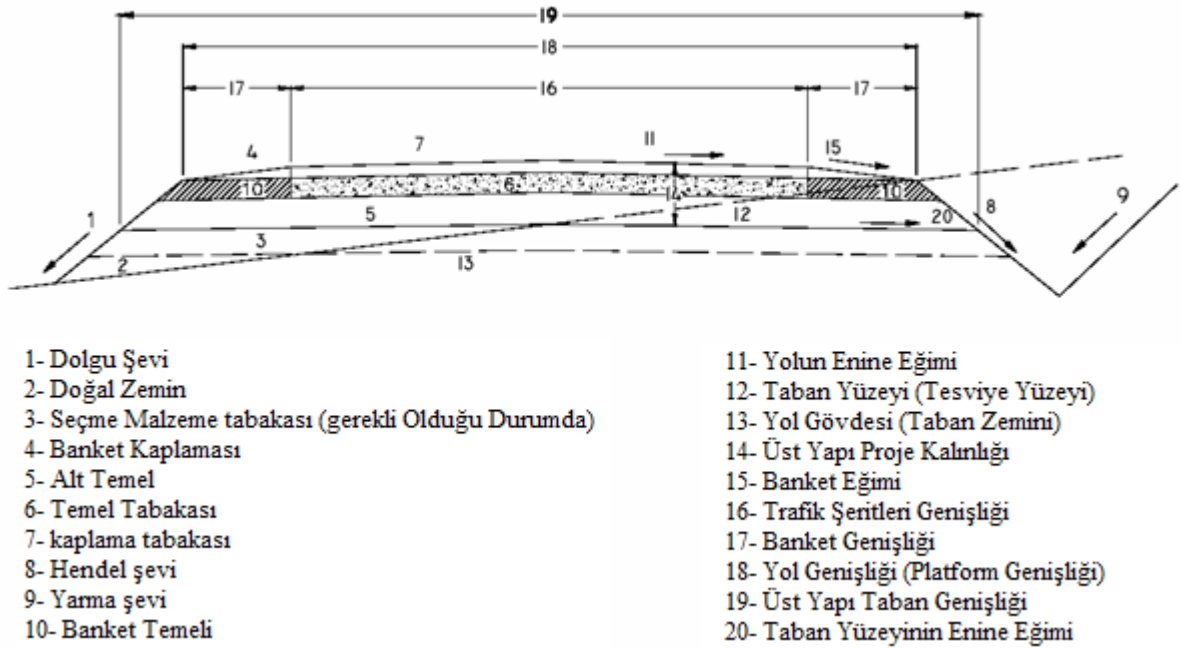


Şekil 2.1. Tipik karayolu en kesiti [Ağar vd.,1998].

2.2.1. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapılar; üzerine gelen yükleri bünyesindeki çeşitli tabakalardan geçirerek, çok iyi yüzeysel temas halinde olduğu taban zeminine ileten, en alttan en üste doğru nitelik ve taşıyıcılık bakımından daha iyi malzemelerden inşa edilen; stabilitesi için esas olarak agrega kilitlenmesi, partikül sürtünmesi ve kohezyona dayanan bir üstyapı tipidir. Aynı zamanda, trafiği güvenli bir şekilde taşımalı ve ekonomik olmalıdır.

Bir esnek üstyapı, proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zemini dayanımı gibi kriterler göz önünde bulundurularak tabakalı olarak projelendirilir. Bu tabakalar; üstyapının üst kısmından taban zeminine inildikçe, tabakalarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri düşecek şekilde kaplama tabakası, temel tabakası, alttemel tabakası ve taban zemini olarak adlandırılır. Esnek üstyapıların dizaynında platform genişliği, banket genişlikleri, hendek ve şevler oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. (Şekil 2.2)



Şekil 2.2. Tipik esnek üstyapı enkesiti [Ağar vd.,1998]

Bütün yapılarda olduğu gibi karayolu üstyapıları da taban zemini üzerine oturur. Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zeminden oluşur. Bir esnek üstyapının davranışı taban zemininin taşıma gücü ile doğrudan doğruya ilişkili olduğundan, yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir. Bu tabakanın esas görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyacı vardır [Karaşahin, 1993].

Taban zemini ile temel tabakası arasına yerleştirilerek sıkıştırılmış daneli malzeme veya uygun bir bağlayıcı malzeme ile stabilize edilmiş malzeme tabakası alttemel tabakasıdır [Umar ve Ağar, 1991]. Alttemel tabakasının esas görevi, bitümlü tabakaların inşası için çalışma platformu oluşturmaktır. Bu tabakada kullanılan malzemeler genel olarak temel tabakasına göre daha düşük kalitededir ve granüler malzemedir. Mümkün mertebe yerel malzemeler ve yol inşaatında kullanılmaya elverişli malzemeler (molozlar, cürufalar, inşaat atıkları gibi) kullanılmaya çalışılır [Saltan, 1999].

Temel tabakası; üstyapının oturduğu doğal zemin olan taban zeminini koruyan, bir veya birden fazla tabakadan oluşabilen, kaplama tabakasından gelen trafik yüklerini alt tabakalara ileten tabakadır. Temel tabakasının asıl görevi kaplama tabakasına dayanak sağlayarak, taşıtların geçişlerinden dolayı oluşan gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitüm bağlayıcılı karışım, stabilize edilmiş veya dikkatle seçilmiş granüler malzeme olabilir. Trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakası kaplama tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Bu tabaka, gerekirse aşınma ve binder olarak iki kısımdan oluşur. Aşınma tabakası çok kaliteli inşa edilmesi gereken, trafiğe dayanım yanında su geçirimsizliğini sağlamak ve sürtünme oluşturmakla görevlidir. Kaplama tabakasının trafiği emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir. Ayrıca, taşıtlardan su sıçramasını önlemek için drenaj tesislerine de sahip olması gereklidir [Umar ve Ağar, 1991].

Trafik yüklerinin bu tabakalardan geçerek taban zeminine iletilmesi, zemin içindeki klasik yük dağılışı gibidir. Yani tekerlek yükleri altında esnek üstyapı deforme olur ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz daha yayarak iletir. Böylece, taban zeminine ulaşan yük kısmen büyük bir alana yayılmış olur. Esnek üstyapıda oluşan gerilmelerin değeri yolun en üst tabakasından alta inildikçe düştüğü için, kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilir. Asfalt betonundan yapılan kaplama tabakası, trafiğin ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan doğruya maruz kaldığı için, yüksek elastisite modülü, kaymaya direnç yanında geçirimsizlik özelliğine de sahip bulunmalıdır. Esnek üstyapılar iyi projelendirilmezse yollar ya taban zemininde veya yol üstyapısını oluşturan tabakaların birinde meydana gelen gerilmelerin malzemenin sınır gerilme değerini aşması ve iç dengenin bozulması yada taban zemininde veya yol üstyapısı tabakalarının birindeki yüksek basınç gerilmeleri ve rutubet oranındaki önemli değişimler altında oldukça büyük oturmaların ortaya çıkması sonucunda bozulmaktadır [Sezgin,2003)].

3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR ve ÖZELİKLERİ

Bitümlü karışımlar, agrega ve uygun oranda karıştırılan bitümlü bağlayıcılardan elde edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılarda kohezyon, bitümlü malzemeler tarafından sağlanırken, agregalar karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır [Tunç, 2001].

Esnek üstyapılarda kullanılan malzemeleri agrega ve bitümlü bağlayıcı olarak iki grupta toplanabilir.

3.1. Agregalar

Yol ve havaalanı esnek kaplamalarında kullanılan agregalar; granüler temel, alttemel tabakalarının tamamını, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça % 90 ila % 95'ini, hacimsel olarak ise % 80 ile % 85'ini oluşturmaktadır. Agregaların mineralojik, boyut, gradasyon, biçim ve yüzey dokusu, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı gibi özellikleri esnek kaplamanın her bir tabakası için ayrı ayrı önem kazanmaktadır [Tunç,2004].

Agregaları doğal agregalar ve yapay agregalar olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Doğal agregalar orijinlerine göre magmatik, tortul ve metamorfik olarak üçe ayrılır. Yapay agregalar ise endüstriyel işlemler sonucu elde edilirler. Cüruf, klinker ve çimento bu gruba girer. Bitümlü kaplamalar yönünden düşündüğümüzde agregaların kökeni ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gereklidir. Agregaları boyutları açısından; kaba agrega 4,76 mm elek üzerinde kalan, ince agrega 4,76 mm ile 0,075 mm elek arasında kalan, mineral filler 0,075 mm' den geçen olarak üç grupta incelenir [Ilıcalı vd.,2001]. Esnek üstyapıların yapısal ve fonksiyonel gereksinimleri yerine getirebilmesi için agregaların aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir.

- Yeterince içsel sürtünme direncine ve stabiliteye sahip olarak trafik yüklerini zemine yayabilmesi ve yük altında aşırı ve kalıcı deformasyonlar oluşturmaması,
- İklimsel ve çevresel etkilerin aşındırmasına karşı dirençli olması,
- Statik ve dinamik yükler karşısında kırılma/parçalanmalara karşı dirençli olması,
- İç gerilmelere (genleşme, büzülme, ıslanma/kuruma, donma/çözülme, vb.) karşı dirençli olması,
- Bağlayıcı (bitüm veya çimento) ile güçlü adezyon yapması
- Yüzey tabakalarında kullanıldığında kayma direnci (veya sürtünme direnci), pürüzlülük, ışık yansıtması, teker aşındırması, gürültü, görünüm, vb. özelliklerin olumlu olması.

Kaplama, temel ve alttemel tabakalarında kullanılan agregaların; trafikten gelen yüklerin zemine iletilmesi, drenajı sağlaması, çevre ve trafik etkilerine karşı dayanıklı ve stabil olabilmesi için agregaların aşağıdaki özellikleri önemli bir yer tutar [Orhan,2006; Saltan,1999; Tunç,2004].

Gradasyon-Yoğunluk: Gradasyon temel ve alttemel tabakalarından beklenen hususların yerine getirilmesini sağlayan en önemli faktördür. Yüksek stabilite ve yüksek dren kabiliyeti, hem yoğun hem de dren kabiliyeti yüksek olan optimum bir gradasyon sayesinde sağlanabilir.

Dayanıklılık (durabilite): Agregalar sıkıştırma esnasında ve trafik yükleri altında kırılmaya, parçalanmaya ve ayrıca çevrenin aşındırıcı etkilerine karşı dirençli olmalıdır.

Dane şekli, yüzey yapısı, kırılmışlık oranı: Açısal kenarlı ve kübik şekilli kırmataş agregaların içsel kilitleme özelliği, yoğun gradasyonlu agregaların stabilitelerinin artmasında en önemli faktördür. Bu nedenle bitümlü karışımlar için mutlaka kırmataş

agrega kullanılmalıdır. Yassı ve ince uzun daneler hem stabilite hem de segregasyon açısından problem yaratmaktadırlar.

Plastisite: İnce malzemenin miktarı arttıkça geçirimsizlik azalmakta ve don duyarlılığı artmaktadır. İnce malzemenin PI ve LL değerleri yüksek olursa hem dren kabiliyeti azalmakta hemde dona karşı hassas olma durumu artmaktadır.

Permeabilite (geçirgenlik): Temel ve alttemel tabakalarının permeabilite karakteristiği; gradasyon ve yoğunluk, kaba agreganın tipi ve dane şekli, No.100 ve 200'den geçen kısmın miktarı ve PI değeri gibi özelliklere bağlıdır. İyi derecelenmiş yoğun gradasyonlu agregalar maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırıldıklarında oldukça geçirimsizdir.

Porozite: Porozitenin artmasıyla agrega bitüm adezyonu da artmaktadır. Ancak porozitenin %2-2,5'dan daha fazla olması halinde adezyonu artırmadığı gibi karışım için bitümlü bağlayıcı ihtiyacını artırmaktadır. Asfalt bağlayıcının artması ekonomik olmadığı gibi kuma riskinin artmasına neden olarak sürüş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle poroz olmayan veya çok poroz olan agregalar bitümlü bağlayıcılı tabakalarda kullanılmamalıdır.

Yüzey dokusu: Yüzey dokusu bitümlü bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyona etki eden önemli bir faktördür. Cilalı yüzeyli agregaların asfaltla kaplanması kolay olmakla beraber adezyonu zayıf olduğundan dolayı kolaylıkla soyulmaktadır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcılı karışımlarda pürüzlü yüzeyli agregalar ile hem yüksek stabilite hem de yüksek soyulma direnci elde edilir.

Cilalanma direnci: Özellikle aşınma tabakasında kullanılan agregaların trafiğin aşındırma etkisi ile dane yüzey pürüzlülüğü giderek cilalı bir hal almakta ve kaplamanın sürtünme

direnci azalarak sürüş emniyetini tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle aşınma tabakasında kullanılacak agregalar, sağlam ve dayanıklı olduğu kadar cilalanmaya karşı da dirençli olmalıdır.

Agregaların fiziksel özelliklerini belirleyen deneyler ve standart numaraları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Agregalara uygulanan deneyler

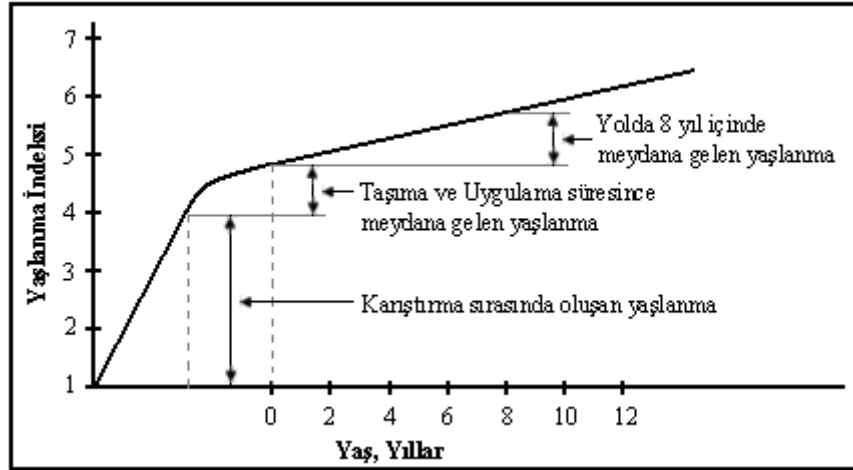
Deney Adı	Standart
Yüzey nemi oranı	(TS 3523)
Özgül ağırlık ve su emme oranı	(TS EN 1097-6)
Hafif madde oranı	(TS 3528)
Don dayanıklılık tayini	(TS EN 1367-1)
Organik madde tayini	(TS EN 1744-1)
Aşınma (Los Angeles) direnci	(TS 3694)
Dane boyutu dağılımı	(TS 1900-1)
Yassılık indeksi	(BS 812)
Cilalanma	(BS 812)
Soyulma ve Yapışma deneyi	(KTŞ)

3.2. Bitümler

Bitümlü karışımların içsel sürtünme direnci ile stabilitesinden agrega sorumlu iken kohezyonu ise bitüm tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca bitüm agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik etkisiyle dağılmasını önlemekte, yarattıkları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyon ile stabilitenin artmasına neden olmakta, karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitüm bağlayıcılı karışımlarda

bitüm ağırlıkça en fazla % 5-7 ve hacimce en fazla % 13-15 gibi küçük oranlarda kullanılsa da esnek kaplamalar için çok önemli bir malzemedir [Tunç,2004].

Bitümlü bağlayıcının kaplama performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı veya durabilitesi sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir [Bell vd.,1992]. Yapılan ayrıntılı çalışmalar yaşlanmanın iki aşamada oluştuğunu göstermektedir. Sıcak karışım tesisinde bitüm, sıcak agregaya karıştırılır ve karışım bir süre yüksek sıcaklıkta kalır. Bu aşamada agrega etrafında bir film tabakası oluşturan bitümde hızlı bir oksidasyon reaksiyonu ortaya çıkar. Taşıma ve uygulama süresince de karışım sıcaklığa maruz kalmaktadır. Bu durumlar “kısa dönem yaşlanma” olarak ifade edilebilir. Oksidasyon sertleşmesi, su ve hava nedeniyle üstyapının ömrü boyunca devam eder buna da “uzun dönem yaşlanma” adı verilir [Öztürk ve Çubuk, 2004]. Şekil 3.1’de bitümlü karışımın zamana bağlı yaşlanma durumu verilmiştir.



Şekil 3.1. Asfaltın Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması [Shell Bitüm El Kitabı, 2004; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

3.2.1. Bitümlerin yaşlanma nedenleri

Oksidasyon: Bitümün hidrokarbon zincirindeki karbonların zaman içinde oksijen ile birleşerek oksitlenmesi sonucu bitümün moleküler ağırlığının artmasına neden olarak bitümün viskozluğu ve katılığının artmasıdır.

Uçucu madde kaybı: Bitümün bünyesinde azda olsa var olan uçucu maddelerin zamanla ve/veya ısıyla uçarak bitümün sertleşmesine neden olmaktadır.

Tiksotropi: Bitümlü bağlayıcı, düşük sıcaklıklarda kendi haline bırakılınca bir rijitlik kazanmaktadırlar ancak bu rijitliğin sebebi bağlayıcının uçucu bileşenlerinin buharlaşması yada sıcaklığın değişmesi olmayıp, bağlayıcının koloidal yapısından kaynaklanmaktadır. Koloidal yapının tesiri ile bağlayıcı belirli bir durgunluk süresinden sonra, soğukta, sünger şeklini andıran, üç ekseninde gerilmiş ağ biçiminde ancak elektronik mikroskopla görülebilecek bir yapı kazanmaktadır. Bu yapı zamanla güçlenerek, bağlayıcıya, dış kuvvetler karşısında, elastik cisimlerininkine benzeyen bir rijitlik kazandırmakta, bu rijitlik mekanik bir sarsıntı sonucunda kaybolmaktadır. Tekrar aynı rijitliği elde etmek için bağlayıcıyı belirli bir süre bekletmek gerekmektedir.

Sıcaklığın artışı da bağlayıcının tiksotropiye bağlı rijitliği üzerinde mekanik bir sarsıntıya eşdeğer etkiler doğurmaktadır. Çünkü sıcaklık artışı ile bağlayıcının misellerden oluşan rijitlik dokusu bozulmakta ve miseller biri birinden ayrılmaya başlamakta bunun sonucunda ise bağlayıcı rijitliğini kaybetmektedir.

Tiksotropi, koloidal bir eriyiğin termik ve mekanik etkiler altında rijitliğini kaybetmesi ve diğer fiziki koşullarının değişmemesi koşulu ile belirli bir durgunluk süresi sonunda rijitliğini tekrar kazanmasıdır.

Polimerleşme: Bitümün hidrokarbon zincirinin zamanla değişime uğrayarak sertleşmesidir.

Parçalanma: Bitümün yapısındaki yağlı ve mumlu kısımların yumuşama periyotları sırasında agrega tarafından absorbe edilmesi sonucu meydana gelen sertleşmedir.

Sineris: Bitümün yağlı kısımlarının ısı ve zaman etkisi ile asfalttan ayrılarak sertleşmesidir [Tunç,2004].

3.3. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Esnek üstyapıların üst tabakalarında kullanılan bitümlü bağlayıcı sıcak karışım esnek üstyapının performansından önemli ölçüde sorumludur. Bitümlü sıcak karışımlar, agrega, bitüm ve hava olmak üzere üç fazlı bir sistemden oluşmaktadır. Agrega katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar gaz fazını oluştururlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yükleme zamanı ile değişmektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansiyarak karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki yapmaktadır. BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar - tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışdır [Kök,2007].

Bitümlü sıcak karışımlar, bir asfalt plentinde agrega ile asfalt bağlayıcının sıcak olarak karıştırılıp yola nakledildikten sonra sıcak olarak sıkıştırılması şeklinde imal edilirler. Bitümlü sıcak karışımlar; aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz olduklarından dolayı temel ve alttemel tabakalarına göre stabil ve durabil olmalıdırlar. Bu tabakalar ayrıca taşıtlar için düzgün pürüzsüz yüzeyleri ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleriyle sürüş emniyetini sağlamalı, trafiğin ve çevrenin aşındırma etkilerine,

deformasyonlara karşı dirençli olmalıdır. Bu tip kaplamalar teker yükleri altında elastik olarak esneme kapasitesine sahip olmalıdır. Kalıcı deformasyon yapmadan yükleri, alt tabakalara ve zemine emniyetle intikal ettirebilmelidir. [Gürer, 2005].

Yüksek standartlı karayolları, otoyollar ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. Bu karışımlar bütün dünyada yol üst yapısında geniş bir şekilde uygulanmaktadır.

Bitümlü Sıcak Karışımda kullanılan agreganın granülometrisi sınıflarına göre dört gruba ayrılır:

Açık Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Bu karışımlarda ince agreganın oranı çok az, dolayısıyla boşluk oranı çok olup %12'den fazladır. Makadam tipi kaplamalar bu sınıfa girer.

Kesikli Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Ara boyutlu malzeme çok azdır veya hiç yoktur. Boşluk oranı %8 ila %12 arasında olan bu tür karışımlar, pürüzlü bir yüzey verirler ve tekerlek izine karşı dirençleri yüksektir.

Yoğun Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Agreganın granülometrisi düşük boşluk verecek şekilde süreklilik gösterir. Bunların boşluk oranı %8'den az olan bitümlü karışımlardır. Bitümlü temel ve asfalt betonu bu sınıfa girer.

Harç Tipi Karışımlar: İnce malzeme oranı fazladır ve kaba agreganın, ince malzeme bitüm karışımı içinde dağılmış halde bulunur. Bu tür karışımlarda boşluk oranı çok düşüktür, bitüm yüzdesi çok yüksek olduğundan penetrasyonu düşük (viskozitesi yüksek) asfalt kullanılır. Beton ve çelik köprüler üzerinde de kullanılan mastik asfalt ve gussasfalt bu tür kaplamalara örnek olarak verilebilir [Oruç,1997].

3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Fiziksel Ve Mekanik Özellikler

Yoğun gradasyonlu bir asfalt kaplama karışımının, hizmet süresince istenen performansı sağlayabilmesi amacıyla uygun bir şekilde dizayn edilebilmesi için karışımların stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik (fleksibilite), kayma

direci, geçirgenlik (permeabilite) ve işlenebilirlik özelliklerine dikkat edilmelidir [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı,2002; Tunç,2001]. Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışımları elde etmek günümüz şartlarında mümkün olmayabilir ancak, en uygun şartları sağlayan karışımların yapılabilmesi için bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir.

3.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi

Stabilite, asfalt kaplama karışımının, etkiyen yüklerden dolayı bünyesinde meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyma yeteneğidir. Stabilite yetersizliği olan kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Ancak, düşük stabilite kadar çok yüksek stabiliteye sahip kaplamalar da yük altında esnek davranış göstermeyerek çatlayacaklarından istenmezler. Kaplamanın stabilitesi, sıcak karışımın içsel sürtünme direncine ve kohezyonuna bağlıdır. Sıcak asfalt karışımların stabilitesine etki eden hususlar karışımın kayma mukavemeti, ısı ve karışımdaki danelerin yer değiştirmeye karşı direnci olan eylemsizlik (atalet) direnci olarak göz önüne alınır [Tunç,2004; Umar ve Ağar,1991; Kurtis,2003;Asfalt El Kitabı,2002]. Sıcak asfalt karışımların kayma mukavemeti (τ) aşağıdaki (3.1) bağıntısı ile tanımlanır [Tunç,2004].

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

Burada ϕ , agrega daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı, c kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki bağ (adezyon) kuvvetini, σ ise normal gerilmeyi ifade etmektedir. İçsel sürtünme açısı agreganın yüzey dokusuna, gradasyonuna, dane şekline, karışımın yoğunluğuna ve asfalt miktarı ile tipine bağlıdır. Kohezyon ise yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklıkla ters orantılı olan asfalt viskozitesinin etkisi ile doğrudan değişiklik göstermekte olup, agreganın porozluğuna, karışımdaki asfalt miktarına, asfaltın viskozluğuna ve ısisına, yükleme hızına ve filler/asfalt oranına bağlıdır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002]. Sonuç olarak;

- Agrega pürüzlülüğü, köşeliliği ve yoğunluğu arttıkça,
- Karışımın boşluk oranı azaldıkça ve yoğunluğu arttıkça,
- Asfaltın viskozitesi arttıkça veya katılaştıkça,
- Isı azaldıkça ve yükleme hızı arttıkça,
- Asfalt tabakası kalınlığı arttıkça,

sıcak asfalt karışımların stabilitesi de artmaktadır [Tunç,2004].

3.4.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği

Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü (S_m), elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzemekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıda belirtilen (3.2) bağıntısı ile saptanır.

$$S_{m(t,i)} = \sigma / \epsilon \quad (3.2)$$

Burada σ ; gerilme, ϵ ; şekil değiştirme, i ; ısı, t yükleme süresi veya hızı olup karışıma giren malzemelerin temel özellikleri ikinci derecede rol oynamaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak yükleme süresi azaldıkça veya yükleme hızı arttıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça, asfaltın viskozitesi arttıkça artacaktır [Tunç,2004]. Bitümlü sıcak karışımın rijitliğinin sıcaklık veya yükleme süresi ile değişimi ve rijitliği etkileyen faktörler Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği [Shell Bitüm El Kitabı, 2004].

3.4.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)

Bir asfalt kaplama karışımının, hava, su, sıcaklık ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koyma yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bu etkiler arasına, asfalt bünyesindeki oksidasyon ve buharlaşma gibi değişiklikler ile suyun donma çözülme etkisi dolayısıyla kaplama ve agregada üzerinde meydana gelen değişiklikler de eklenebilir. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agregada gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir. Karışımındaki asfalt miktarının artırılması ile agregada danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın asfalt filmler yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltarak karışıma hava ve su girişini zorlaştıracaktır. Ancak, daha kalın asfalt filmi tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kuma oluşumuna yatkın olduğuna dikkat edilmelidir.

Su etkisine karşı koymak için de aynı koşullar yanında daha yoğun bir karışım kullanmak, asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek dirence sahip olacaktır. Karışımında yetersiz oranda asfalt kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, sıcak karıştırma işleminde asfaltın aşırı derecede ısıtılması durumunda, yaşlanmanın etkisiyle ileriki aşamalarda asfaltın kırılgan olmasının sonucu olarak ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak

agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımda kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş şartı yanında, aşınmaya, soyulmaya ve ufalanmaya karşı da dirençli olması istenir [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002; Umar ve Ağar,1991; Kurtis,2003].

3.4.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti

Yorulma, malzemenin çekme mukavemetinden daha düşük değere sahip tekrarlı gerilme altında meydana gelen kırılmadır. Yorulma mukavemeti ise, bitümlü sıcak kaplamanın tekerlek yüklerinin geçmesinden doğan tekrarlı gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına müsaade ederek veya esneyerek, kaplamada çatlamlar oluşmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yapılan çalışmalar bir kaplama karışımının yorulma direnci üzerinde asfalt içeriğinin çok büyük önem taşıdığını göstermiştir. Ayrıca yapılan deneyler, yoğun gradasyonlu asfalt karışımların, açık gradasyonlu karışımlara göre daha yüksek yorulma mukavemetine sahip olduklarını göstermiştir. Karışım içine, sıkıştırılmış bir kaplamada kismaya sebep olmaksızın daha yüksek asfalt içeriğine izin veren iyi derecelenmiş agregalar katılmalıdır [Asfalt El Kitabı, 2002; Shell Bitüm El Kitabı, 2004]. Yorulma mukavemeti; kaplamanın rijitliği, yoğunluğu ile kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça, asfalt miktarı arttıkça artış göstermektedir [Tunç,2004].

Bir kaplamanın yorulma ömrünü tanımlayan genel bağıntı (3.3) bağıntısı ile ifade edilmektedir [Tunç,2004; Shell Bitüm El Kitabı, 2004].

$$N_f = K(1/\epsilon)^k \quad (3.3)$$

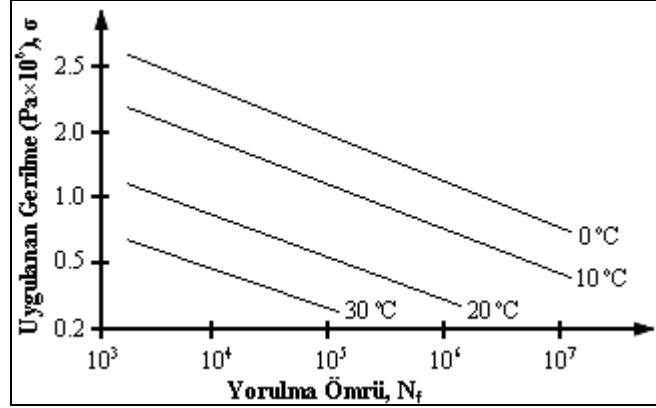
N_f : Yorulma çatlağı meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı (yorulma ömrü)

ϵ : Uygulanan şekil değiştirmenin maksimum değeri,

K ve k : Bitümlü karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar.

Aynı özelliklere sahip karışımların farklı sıcaklıklarda ve sabit gerilme altındaki yorulma ömürleri Şekil 3.3' te gösterilmiştir. Çizgiler esas olarak paralel olup düşük

sıcaklıklarda daha uzun yorulma ömrü olduğunu göstermektedir. Deneylerin farklı frekanslarda gerçekleştirilmesi durumunda sonuç yine benzer çıkacaktır yani, yüksek frekanslarda yorulma ömrü artmaktadır [Shell Bitüm El Kitabı, 2004].



Şekil 3.3. Karışımların Sıcaklık, Gerilme ve Yorulma Ömrü İlişkisi [Shell Bitüm El Kitabı, 2004].

3.4.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)

Esneklik, bitümlü sıcak karışım kaplamaların trafik ve çevre etkileriyle, çatlamadan hafifçe eğilebilme ve temel ve alttemel tabakalarının tedrici oturmalarına uyabilme yeteneğini ifade etmektedir. Genel olarak bir asfalt kaplama karışımının esnekliği, yüksek asfalt içeriği ve nispeten açık gradasyonlu veya boşluklu agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliğindeki artışın, stabilitesinin azalacağı anlamına geleceği de göz önünde tutulmalıdır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002].

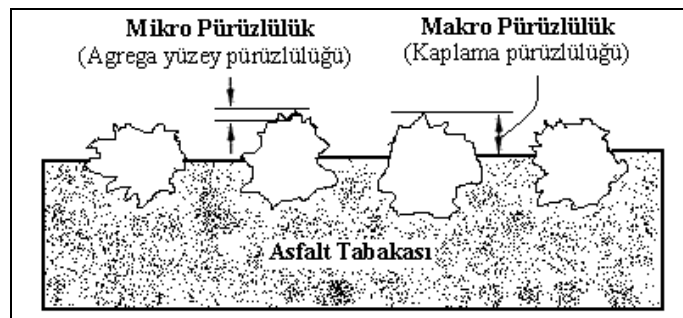
3.4.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)

Geçirgenlik, bitümlü sıcak karışım kaplamasının içine doğru veya içinden hava ve su geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki su, hava ve gazların geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması ile bünyesine giren hava

ve su etkisiyle asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın geçirimsizliği, karışımın asfalt miktarı, yoğunluğu ve sıkıştırması arttıkça boşlukları azalacağından artacaktır. Ancak, kaplamadaki stabilite gerekliliği, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla bir miktar boşluk bırakmak gereklidir. Bunun yanında, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002].

3.4.8. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci

Kayma direnci, bir asfalt kaplamasının üzerinde geçen araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurbalarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için teker ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme direncini ifade eder. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılmasıyla artmaktadır. Asfalt kaplamaların kayma direnci Şekil 3.4'te görüldüğü gibi makro ve mikro pürüzlülüğüne bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir [Tunç,2004].



Şekil 3.4. Kaplama Pürüzlülüğü [Tunç, 2004; Geçkil, 2008].

3.4.9. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışımın serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agrega kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir [Kurtis,2003].

İşlenebilirlik genel olarak;

- Kaba agrega miktarı ve agrega maksimum dane boyutu arttıkça,
- Kırmataş agrega kullanıldıkça ve agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- Karışımın ısısı düştükçe,
- Asfalt katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça,
- Mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça,

azalmaktadır [Tunç,2004].

İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırma zorlukları doğuracaklarından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir.

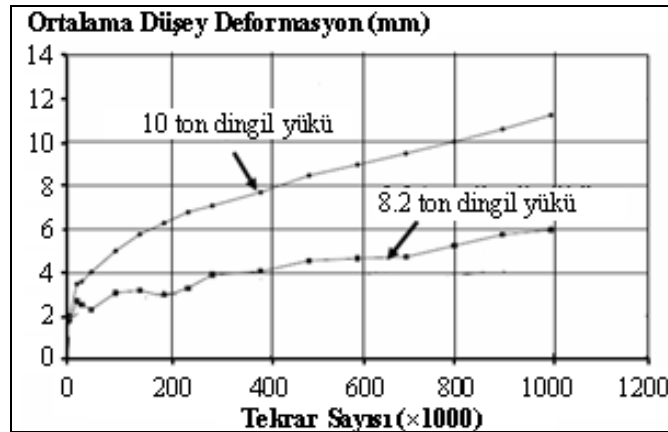
3.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ilk inşa edildiklerinde çok iyi dizayn edilmiş olsalar bile trafiğe açıldıktan sonra iklim, çevre ve trafik koşulları altında belirli bir süre sonra bozulmaya başlarlar. Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenlerinin tasarım, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçimi, iklim koşullarının ağırlığı ve denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. Yapılan bir araştırmada Türkiye’de kamyonların Avrupa standartlarından yarı yarıya düşük motor gücüne sahip oldukları halde, standartlarının iki katı kadar yükle trafiğe çıktıkları belirtilmektedir [Ceran,2007]. Çoğunlukla 8,2 ton standart dingil yüküne göre tasarlanmış

ve inşa edilmiş olan yollarımızda hiçbir iyileştirme yapılmadan yasal dingil yükü 1997 tarihinde yürürlüğe giren Karayolları Trafik Yönetmeliğine göre tahriksiz tek dingilde 10 ton, tahrikli tek dingilde 11,5 tona çıkarılmıştır. Dolayısıyla karayollarımızda oluşan bozulmaların büyük bir kısmını aşırı yüklenmiş dingil yükleri oluşturmaktadır [Karayolları Trafik Yönetmeliği, 2003; Çakıroğlu,1996]. Farklı dingil yükleri standart dingil yüküne oranla yol esnek üstyapısına önemli zararlar verir ve bu zarar “araç zarar faktörü” veya “eşdeğerlik faktörü” olarak adlandırılır. Taşıt eşdeğerlik faktörü aşağıdaki (3.4) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [Çakıroğlu,1996].

$$E.F. = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Li}{8.2} \right|^{\alpha} \quad (3.4)$$

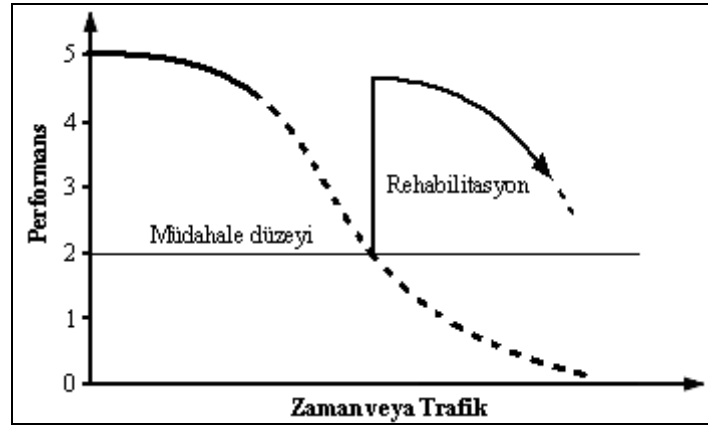
Burada $E.F.$, taşıt eşdeğerlik faktörü, Li dingil yükü, i taşıtın dingil sayısı ve α yol üstyapısının servis yeteneğine göre değişen bir katsayı olup ülkemiz koşulları için 4,4 olarak alınmaktadır. Bu bağıntıya göre, yoldan geçen 10 tonluk dingil yüküne sahip bir kamyonun yola verdiği zarar, $E.F. = (10/8,2)^{4,4} = 2,4$ kat daha fazla olacaktır. Buna göre, belirli sayıdaki 8,2 tonluk dingil yükü geçeceği kabulüne göre 20 yıl olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş bir yolda, aynı sayıda 10 tonluk dingil yükü geçerse yolun ömrü $20/2,4 = 8,3$ yıla düşecektir. Aşağıda Şekil 3.5’ te, 8,2 tonluk dingil yükü ile 10 tonluk bir dingil yükünün bitümlü kaplama üzerinde oluşturdukları deformasyonlar görülmektedir.



Şekil 3.5. Farklı Dingil Yüklerinin Kaplamada Oluşturduğu Deformasyon [Karaşahin,2007].

Kaplamalar iklim, çevre ve trafik koşulları altında zamanla bozulmaya başlayarak periyodik bakıma ihtiyaç duyarlar ve bakım yapılmazsa hizmet veremeyecek duruma

gelirler. Kaplamanın performansı, yolun yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet etme kabiliyeti olan servis yeteneği indeksi olarak da bilinir ve genellikle iyiden kötüye doğru 5 ile 0 arasında değişen bir ölçek ile belirlenir. Bir karayolunun son servis yeteneği indeksi, o üstyapının daha fazla hizmet veremeyeceği anlamına gelir ve yolun önemine göre 2 ile 3 arasında değişir. Bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın veya ekonomik ömrü içerisinde ondan ekonomik bir şekilde faydalanmanın yolu, gerekli periyotlarla bakım yapmaktır [Çakıroğlu,1996]. Şekil 3.6’ da bir üstyapının gelecekteki bozulma durumuna göre bakım zamanını tahmin etmek için kullanılacak performans eğrisi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.6. Üstyapı Performans Eğrisi ve Rehabilitasyon Gösterimi [Çakıroğlu,1996; Bekheet vd., 2005; Terzi ve Karaşahin,2004].

Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlamlar ve ayrışmalar olmak üzere üçe ayrılmaktadır. En fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklanan bozulmalardır [Tunç,2004; Brown vd., 2001].

3.5.1. Deformasyonlar

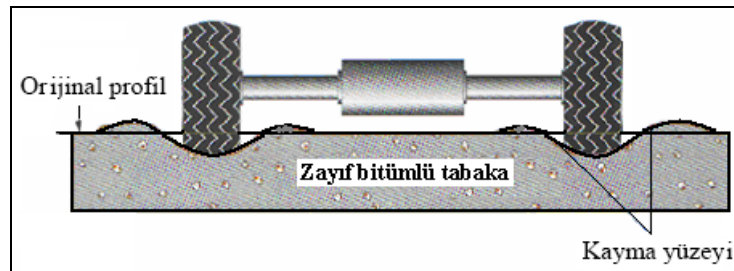
Deformasyonlar, genel olarak stabilite yetersizliğinden kaynaklanan yapısal veya kalıcı şekil değiştirmeler olup sürüş konforu ve emniyeti bakımından önemli sakıncaları olan bozulmalardır.

3.5.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir ve aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır [Tunç,2004; Asphalt El Kitabı, 2002; Karayolu Bakım El Kitabı, 1998].

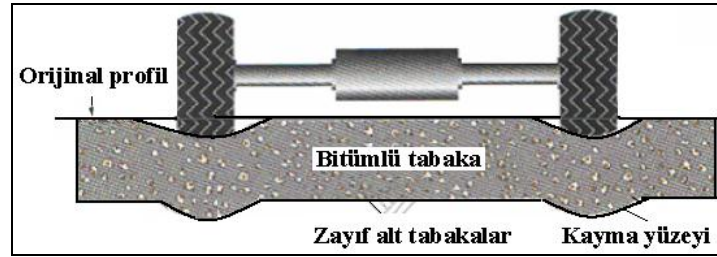
- Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı,
- Yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt,
- Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi,
- Yuvarlak dere malzemesi,
- Yetersiz sıkıştırma.

Bitümlü sıcak karışım tabakaları, tekrarlı ağır yüklere maruz kaldıklarında bünyelerinde iki şekilde tekerlek izi oluşmaktadır. Birinci durumda tekerlek izi, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi kaplama tabakasında meydana gelmiş ise sıcak karışımın, trafik yüklerine karşı koyacak kayma mukavemetine sahip olmaması veya plastik akma nedeniyle oluşur. Zayıf bir asfalt tabakasında, her ağır kamyon geçişiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur ve bu deformasyonlar da karışımın aşağı ve kenarlara plastik yer değiştirmesini sağlayarak tekerlek izi oluşumuna neden olur. Plastik akma, karışımın yük altında yanal hareketidir ve karışımda aşırı asfalt ve yuvarlak agrega bulunması ve yetersiz sıkıştırma sonucu oluşmaktadır [Brown vd., 2001; Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996].



Şekil 3.7. Zayıf Bitümlü Tabakada Tekerlek İzi Oluşumu [Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996; Balta, 2004].

Tekerlek izi Şekil 3.8 'de belirtildiği gibi sadece asfalt kaplama tabakasında değil aynı zamanda kaplama altındaki tabakalarda da meydana gelmiş ise bu olay yapısal bir bozulma olarak değerlendirilir. Bu tür bozulmaların nedeni, asfalt kaplama tabakası ve alt tabakaların yetersiz kalınlıkları, temel ve alttemel tabakalarının stabilitelerinin düşüklüğü, zemin tabakasının sağladığı desteğin azlığı ve kaplamanın maruz kaldığı yüklerin büyüklükleri ve şiddetidir [Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996; Balta, 2004].



Şekil 3.8. Zayıf Alt Tabakalarda Tekerlek İzi Oluşumu [Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996; Balta, 2004].

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen tekerlek izi bozulmalarına karşı, karışımın kayma mukavemetini arttırmanın yolu, karışımda yüksek içsel sürtünme direncine sahip agrega ile yüksek kaplama sıcaklıklarda daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanmaktır.

3.5.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Oturmalar, kaplama altındaki alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların satha yansımaları olup bitümlü kaplamaya bağlı değildir. Bunlar 0,5–2 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutta oluşur ve bitümlü tabakalar esneklikleri sayesinde genellikle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna intibak ederler ancak, kırılğan asfalt kaplamalarda çatlamalar görülür. Oturmaların oluşum sebepleri; yetersiz tabaka kalınlıkları, sıkıştırma hataları, yetersiz drenaj, zemin oturmaları ve imalat sorunlarıdır [Asfalt El Kitabı, 2002; Asfalt ve Uygulamaları, 2001; Kuloğlu, 2000].

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama sathına göre alçakta kalmış, 0,5–1,5 m dairesel çapta ve derinlikleri 2–5 cm ya da daha fazla olabilen ve içlerinde su biriken küçük çukurlardır. Genel nedenleri oturma bozulmaları ile aynıdır [Asfalt El Kitabı, 2002; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

3.5.1.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve belirli biçimde dalgaya benzeyen, plastik bir hareket sonucu oluşan kaplama deformasyonlarıdır. Bu tip deformasyonlar kavşaklar, otobüs durakları, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde ondülasyon şeklinde görülür. Genel olarak düşük stabiliteli karışım, yetersiz tabaka kalınlığı, düşük viskoziteli asfalt, aşırı asfalt miktarı, rutubet miktarı, zayıf yapıştırma tabakası ve ağır taşıtların yoğun durma-kalkma hareketi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

Kabarmalar, genel olarak doğal zeminin veya üst tabakaların şişmesiyle kaplama tabakasının lokal olarak yukarıya doğru deplasmanıdır. Doğal zemindeki suyun donma çözülmesinden ve zeminin şişme karakterine sahip olmasından meydana gelir ve genel nedenleri ondülasyonlarla aynıdır [Tunç,2004; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

3.5.2. Çatlaklar

Çatlamalar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Stabilite çatlakları trafik yüklerinin etkisi ile kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde tabakanın alt tarafında başlamakta ve zamanla kaplama yüzeyine çıkması sonucu oluşmaktadır (Şekil 3.9). Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekerrürü ile kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama yapıldığında, alttaki tabakada oluşmuş çatlakların

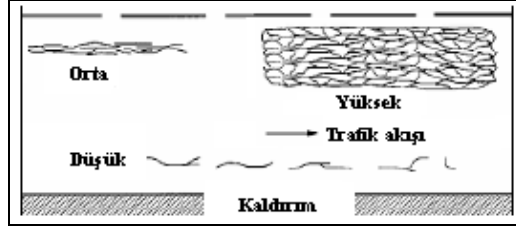
üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir. Stabilité, yorulma ve yansıma çatlakları genellikle trafik etkisi ile oluşurken, çevre ve iklim etkisiyle oluşan büzülme veya düşük ısı çatlakları ise trafiğin etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır [Tunç,2004].



Şekil 3.9. Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b) [Karaşahin,2007].

3.5.2.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)

Yorulma çatlağı, asfalt kaplamalara uygulanan tekrarlı ağır tekerlek yüklerden dolayı, çatlak oluşumuna sebebiyet verecek şekilde kaplamanın çekme gerilme dayanımının aşılması ile oluşur. Yorulma çatlağı oluşumunun ilk belirtisi, trafik yönünde aralıklı olarak boyuna tekerlek izi çatlaklarının meydana gelmesidir. Oluşan aralıklı boyuna çatlaklar zamanla birleşerek, ardından bu çatlaklar enine çatlakların oluşmasına neden olarak haliyle daha fazla çatlağın oluşumuna sebep olması nedeniyle, kaplamada artan bir bozulma türüdür. Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tüm kesiminde veya belirli kesiminde oluşurlar (Şekil 3.10). Oluşan çatlaklı yapı, bünyesine su alarak trafik ve suyun hidrostatik basıncının etkisiyle sökülme ve parçalanmalar sonucu kaplama yüzeyinde yerel çukurlar oluşmaktadır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002; Brown vd., 2001; Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996].



Şekil 3.10. Yorulma Çatlaklarının Dereceleri [Balta, 2004].

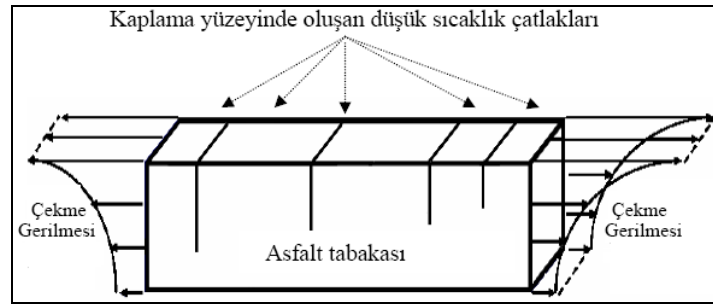
Yorulma çatlakları genellikle ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle oluşmaktadır. Ayrıca asfalt tabaka, trafik yükü altında yeterli derecede deformasyona uyabilecek biçimde değilse yani sertse, yük tekrarı ile çatlamlar oluşur. Karışımın sertliği asfaltın sertliğine bağlı olduğundan, asfaltın oksidasyon ile yaşlanması kohezyonu, bu da karışımın rijitliğini artırarak yorulma çatlaklarının oluşmasını sağlayacaktır. Genellikle kaplamada oluşan yorulma çatlakları, kaplamanın tasarım ömrünü tamamladığının bir göstergesidir ve dolayısıyla kaplamada planlı bir iyileştirme yapılmalıdır. Çatlamlar, tasarım ömründen önce meydana gelmişse kaplamanın beklenenden daha fazla trafiğe maruz kaldığının göstergesi olabilir. [Geçkil,2008]

Sonuç olarak, yorulma çatlaklarını önlemek için, tasarım aşamasında ağır taşıt trafiğini doğru hesaplamak, kaplama altı tabakaları kuru tutmak, kaplama kalınlıklarını arttırmak, nemden etkilenmeyen uygun agrega kullanmak, yeterli esneklikte malzeme kullanmak ve özellikle sıcak karışımın elastik davranışı asfalta bağlı olduğundan sertliği sınırlandırılmış, yüksek elastisiteye sahip yumuşak asfalt kullanmak gerekir [Tunç,2004; Brown vd., 2001; Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996; Harold vd.,1995].

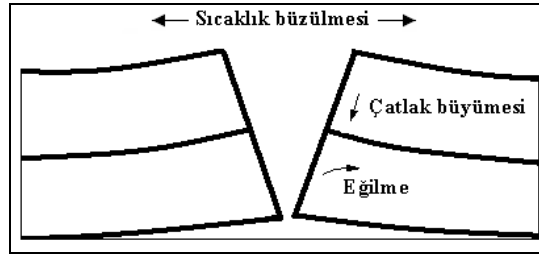
3.5.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, trafiğin etkilerinden çok, soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Kaplamanın enine

büzülmesi boyuna büzülmesinden daha kolay olduğu için genellikle 6–9 metre aralıklarla enine oluşturmaktadırlar. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu düşük sıcaklık çatlakları, ağır dingil yükleri nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerle birlikte Şekil 3.12’de olduğu gibi yüzeyden başlayıp alta doğru derinleşerek inen yapısal bozulmalara yol açar [Tunç,2004; Shell Bitüm El Kitabı, 2004; Balta, 2004].



Şekil 3.11. Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları [Balta, 2004].



Şekil 3.12. Düşük Sıcaklık Çatlağının Büyümesi [Tunç,2004; Shell Bitüm El Kitabı, 2004].

Bu çatlakların en önemli nedeni asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Düşük sıcaklıklarda rijit bir davranış gösteren asfalt, çekme gerilmesi altında deformasyon göstermeden kırılma gösterir. Bu sebeple soğuk bölgelerde yumuşak ve sıcaklığa az duyarlı asfalt kullanmak bu tür çatlakların azalmasını sağlar. Ayrıca, karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok

soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetlerini de dikkate almak gerekir [Tunç,2004; Shell Bitüm El Kitabı, 2004; Balta, 2004].

3.5.2.3. Diğer Çatlaklar

Büzülme çatlakları; timsah sırtı çatlaklara benzemektedir ancak onlardan ayıran husus, blokların büyük, keskin açılı ve genellikle dik açılı olmalarıdır. Asfalt karışımından ya da temel veya zeminde görülen hacim değişikliklerinden kaynaklanır. Trafiğin az oluşu bu tip çatlamların oluşumunu hızlandırmaktadır [Tunç,2004; Asfalt El Kitabı, 2002; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

Kenar çatlakları; yol eksenine paralel ve genellikle kaplama kenarından 30–50 cm içeride oluşur. Genel olarak banketin yanal desteğinin azlığı, bankette oturma, yetersiz drenaj ve don etkisi, kaplamaya yakın bitki örtüsü ve nem gibi nedenlerden oluşur [Tunç,2004; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

Derz çatlakları; kaplamanın serme ve sıkıştırma esnasında ek yerlerinin sıkıştırma tekniğine uygun olmayan işçilik ve sıkıştırma yapılması halinde zamanla oluşmaktadır [Tunç,2004;].

Kayma çatlakları; ağır taşıt tekerlerinin kaplamaya yaptıkları yatay kuvvetlerin etkisiyle tabakaların birbirine göre yanal hareketlerinden yani kaplama tabakasının temel tabakası üzerinde kayması ile oluşur. Genel olarak yetersiz veya aşırı yapışma tabakası, yetersiz kaplama kalınlığı, aşırı ağır taşıtlar ve karışımın kum içermesi gibi nedenlerden oluşur [Tunç,2004; Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

Enine çatlaklar; yol eksenine dik oluşan ve nadiren görülen çatlaklardır. Genellikle yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj, sericinin uzun süreli duraklaması, düşük sıcaklık ve alt tabakadaki çatlağın yansması gibi nedenlerle de oluşmaktadır [Tunç,2004].

Yansma çatlakları; genellikle kaplama altındaki rijit ya da yarı rijit tabakalarda meydana gelmiş çatlak ve açılmaların kaplamaya yansmasıdır [Asfalt ve Uygulamaları, 2001].

3.5.4. Ayırışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega danelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayırışmalar genel olarak yapım hataları, düşük kaliteli malzeme kullanımı, kirli ve ıslak agrega kullanımı, hatalı serim ve sıkıştırma ve yetersiz asfalt veya yetersiz adezyon gibi nedenlerden oluşur [Tunç,2004].

3.5.4.1. Soyulmalar

Soyulma, agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon bağının zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilir. Soyulma genellikle asfalt kaplamanın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder ve agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisiyle agregadan ayrılması ve dolayısı ile agrega danelerinin çıplak kalması olayıdır. Soyulmada rol alan önemli faktörler, agrega ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşimi, üstyapı tasarımı, karışım tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik olarak sıralanabilir. Bu tür bozulmalarda en önemli faktör, agrega ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır. Kuru ve temiz agrega kullanımı, iyi bağlayıcılık karakteri olan asfalt, yüksek asfalt oranı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı soyulmayı azaltır.

3.5.4.2. Sökülmeler

Asfalt ve agrega arasındaki bağ eksikliğinden dolayı agregaların zamanla satıhtan koparak ayrılmasıdır. Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının parça veya tabaka halinde soyulması şeklinde meydana gelir. Sökülme, agrega danelerinin yavaş yavaş yüzeyden aşağıya doğru kopması ile oluşur. Önce ince malzemelerin kopması ile çok küçük çukurlar oluşur ve daha sonra aşındırma ile daha büyük parçalar koparak sökülmeler meydana gelir.

Sökülmeler genel olarak yetersiz sıkıştırma, kirli agrega, yetersiz drenaj, soğuk ve nemli havada imalat, asfalt miktarı azlığı, ince tabaka kalınlığı ve asfaltın aşırı ısıtılması gibi nedenlerden meydana gelir. Sökülmenin üst düzeydeki göstergesi, çanak şeklinde, çapları 25 cm ile 75 cm arasında değişen ve farklı derinlikteki çukurlar şeklinde görülür [Tunç,2004].

4. BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KULLANILAN KATKILAR

Bitümlü bağlayıcılar ve karışımlar özelliklerinin iyileştirilmesi için modifiye edilir. Özellikle son yıllarda bu konudaki çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilginin artmasında etkili olan faktörler şöyle sıralanabilir:

- Her zaman için ham petrol ve bitüm fiyatlarında artış tehlikesi vardır.
- Trafik yüklerinde önemli artışlar meydana gelmiştir,
- Kaynak sıkıntılarından dolayı gerekli onarımların zamanında yapılamaması durumuyla oldukça sık karşılaşılmıştır.
- Yakıt dökülmeleri gibi özel durumlara karşı dayanımın artırılması gereksinimleri olmuştur,
- Bazı endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi veya başka bir yere nakledilmesi konusunda oluşan çevreci ve ekonomik baskılar sonucu bu atıkların bitüm katkı maddesi olarak kullanılması düşüncesine sebep olmuştur,
- İnşaat ekipmanlarındaki gelişme, katkı kullanılması olanağını sağlayabilecek seviyeye ulaşmıştır.

Esnek üstyapı karışımlarında kullanılan bitümün, asfalt çimentosu, emülsiyonlar, katbekler gibi bitüm çeşitlerinin modifiye edilmesi mümkündür. Piyasada çok çeşitli olarak bulunan katkı maddelerinin hepsinin amaçlanan iyileştirmeyi sağlayamadığı görülmüş, bunlardan bazıları endüstriyel atıklardan oluşmakla beraber katkı maddesi olarak piyasaya sürülmektedir ancak bazı katkı malzemeleri ise yine farklı endüstri kollarının yan ürünleri olsalar da bağlayıcıdaki fiziksel ve kimyasal değişimleri sağlamak için formülize edilirler. İşte bu tip ürünler, onaya koyulmak suretiyle bitüm modifikasyonunda kullanılırlar.

Bitümlü sıcak karışımlarda görülen problemleri gidermek bakımından değişiklik yapılabilir bir kaç olasılık aşağıdaki gibi sıralabilir:

- Kaplama dizaynının geliştirilmesi (Yapısal, Drenaj, Malzeme vb.),
- Üstyapı malzemelerinin ve üstyapıların şartname özelliklerinin gözden geçirilmesi,
- İnşaat süresindeki kalite kontrolün iyileştirilmesi,
- Bağlayıcı sistemlerinin geliştirilmesi
- Bu şıkların tümünün bir arada gerçekleşmesi doğal olarak performansı olumlu yönde etkileyecektir.

İdeal bir bağlayıcının aşağıdaki özellikleri sağlaması istenir :

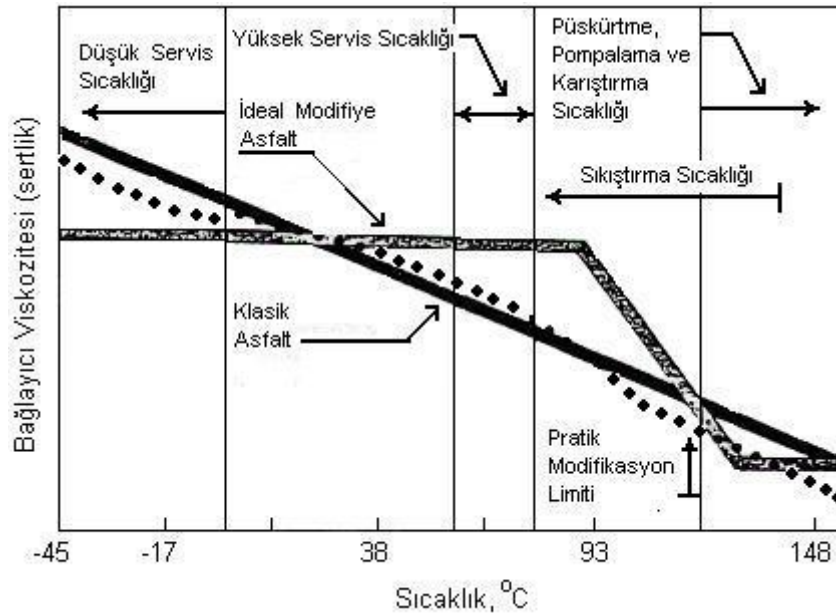
- Yüksek sıcaklıklarda (yaz mevsimi) tekerlek izlerinin en aza indirilmesi için yeterli rijitliğe sahip olmalıdır. Bununla birlikte bitümlü sıcak karışımın yorulma ömrünü artırmalıdır,
- Düşük sıcaklıklarda (kış mevsimi) ise yeterli esnekliğe sahip olup, termal çatlakları engellemelidir,
- Rutubetli ortamlarda soyulmayı azaltmak için bitüm ile agrega arasındaki adezyonu arttırmalıdır.

Bu değişik durumlar karşısında karışımın özelliklerinin değiştirilebilmesi için karışım dizaynını değiştirmek veya bitüm miktarıyla oynamak yeterli olur gibi görünmekteyse de katkı kullanımı yeni olasılıklar ve seçenekler ortaya koymaktadır.

Modifiye bitümlerin çoğu genellikle yoğun gradasyonlu BSK'da ve açık gradasyonlu sürtünme tabakalarında kullanılmaktadır. Sıkça kullanılan modifiyerler, işlenmiş kauçuk, blok kopolimerler ve soyulma önleyici kimyasal maddelerdir. Mineral filler, genleştiricilerin bazıları, kauçuklar, plastikler, fiberler, oksidanlar ve hidrokarbonlar sertliği; yüksek sıcaklıklarda arttırıp, düşük sıcaklıklarda azaltmak için kullanılırlar. Suyun bulunduğu durumlarda bitüm agrega arasındaki adezyonu arttırmak ve soyulmaya karşı direnç sağlamak için kimyasal maddeler ve kireç kullanılır. Kauçuk ve plastik gibi bazı polimerik maddeler ikinci bir fayda olarak adezyonun

artmasına yardımcı olurlar. Bunlara ek olarak mineral filler, antioksidanlar ve hidrokarbonlar bağlayıcının uzun dönemde dayanıklılığını da olumlu yönde etkilerler. Herhangi bir modifiyerin klasik asfalt çimentosu üzerindeki etkilerinin bilinmesi uygulayıcının gerekli taşıma, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını doğru seçmesine yardımcı olur.

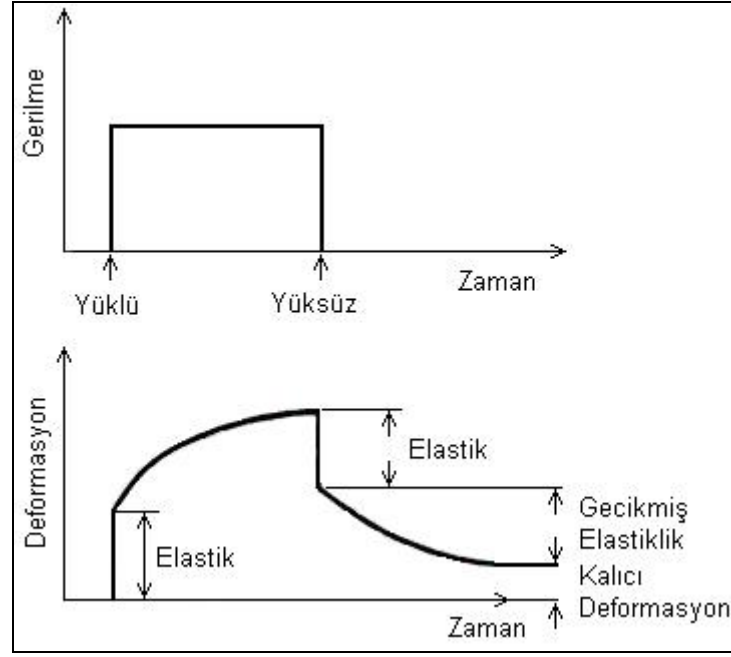
Şekil 4.1’ de tipik bir asfalt çimentosu ve ideal modifiye asfalt için sıcaklık-viskozite ilişkisini göstermektedir.



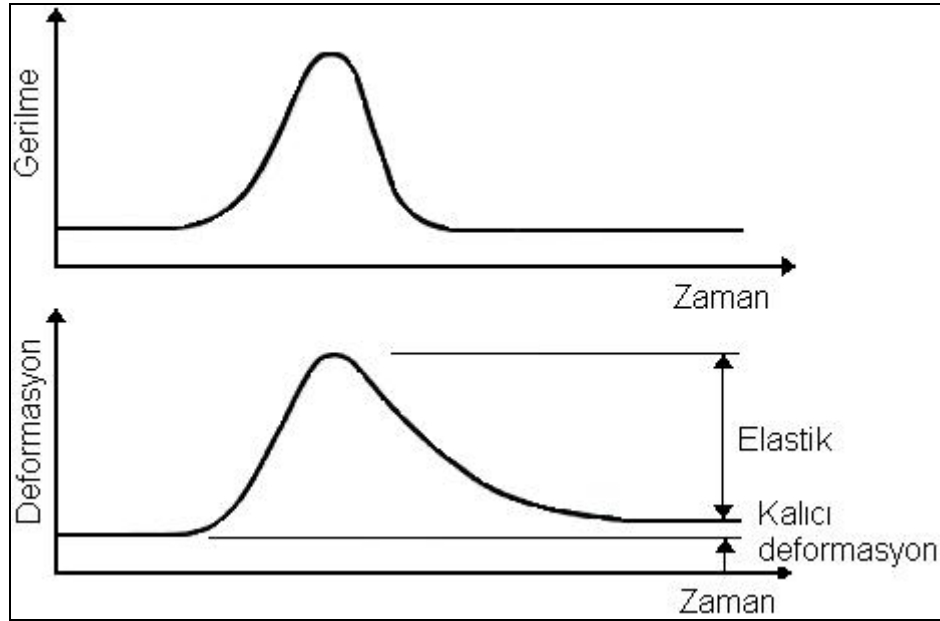
Şekil 4.1 İdeal Bir Modifiyerle Sağlanabilen, Karışımın Sertliğinde Oluşan Değişimler.

4.1. Bitümlü Karışımlarda Katkı Maddelerinin Rolü

Bitüm, tüm bitümlü malzemenin viskoelastik davranışından sorumlu olduğundan, kalıcı deformasyonlar ve çatlaklara karşı direnç gibi üstyapı performans özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bir bitümlü malzemede maruz kalınan deformasyon oranı, yükleme süresi ve ısı ile birlikte artar. Bu etki şekil 4.2 ve 4.3' te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Statik Yüklemede Viskoelastik Davranış.



Şekil 4.3. Hareketli Tekerlek Yüğü Altında Viskoelastik Davranış.

Şekil 4.2' de basit bir akma testinde bitümlü malzemenin davranışını göstermektedir. Uygulanan yükle meydana gelen deformasyon, yükleme kaldırılıncaya kadar, zamanla tedrici bir deformasyon artışından sonra bir anlık elastik davranış gösterir. Deformasyondaki

zamanla meydana gelen değişim, malzemenin viskoz davranışından dolayıdır. Yükün kaldırılmasıyla, anlık elastik deformasyon ve zamanla bazı ilave elastik deformasyonlar da oluşur. Bu "gecikmeli geri dönüş" olarak bilinir. Sonuç olarak, malzemenin viskoz davranışından dolayı bir miktar kalıcı deformasyon söz konusudur.

Şekil 4.3' te bir bitümlü karışımda, hareketli trafik yükleri nedenleriyle meydana gelen deformasyon davranışı görülmektedir. Burada, elastik davranışın iki bileşenini birbirinden ayırmak mümkün değildir. Ancak, küçük kalıcı deformasyon ve daha büyük elastik deformasyon söz konusudur. Şekil 4.3' te gösterilen, tek yüklemeyle meydana gelen küçük kalıcı deformasyon, üstyapıdaki bir kaç milyon yükleme sonucunda büyük bir yığışım ile yüzey deformasyonuna yani oluklanmaya neden olur. Çevre sıcaklığının yüksek olduğu durumda ve trafiğin yavaş hareket ettiği yada durduğu yerlerde neden daha fazla deformasyon meydana geldiği bu şekilde açıklanabilir.

Bitüm katkı maddelerinin asıl rollerinden birisi bitümün yada bitümlü karışımın diğer sıcaklıklardaki özelliklerini etkilemeksizin yüksek yol sıcaklıklarındaki direncini arttırmaktır. Bu hem asfaltın viskoelastik özelliğini azaltan bitüm sertleşmesi ile (buna karşılık gelen kalıcı deformasyonlarda da azalamaya sebep olur) hem de bitümün elastik bileşenlerinin artırılması ile (buda viskoz bileşimin azalmasına ve yine buna karşılık gelen kalıcı deformasyonun azalmasına sebep olur) başarılıdır.

4.2. Bitüm ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilme Sebepleri

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile en genel anlamda yol üst yapılarının yüksek yol sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak oluklanma, ötelenme ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı dirençli olması düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca, trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen, bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük servis sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar elde etmek ve böylece çatlakları azaltmak,
- Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini (oluklanmayı) azaltmak,
- Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
- Uygulama sıcaklıklarında viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği ve sıkıştırmayı geliştirmek,
- Karışımların mukavemet ve stabilitesini arttırmak,
- Karışımların aşınma direncini arttırmak ve çözülme azaltmak,
- Karışımların yorulma direncini arttırmak,
- Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
- Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini iyileştirip soyulmayı azaltmak,
- Akmayı azaltmak,
- Çatlakların dolmasını sağlamak,
- Yakıt dökülmelerine karşı dayanım sağlamak,
- Yaşlanmaya karşı dayanımı arttırmak,
- Kaplama tabakalarının yapısal kalınlıklarını azaltmak
- Yapım mevsimini uzatmak,
- Uygulama alanlarını zenginleştirmek,
- Yapıştırıcı tabaka olarak kullanabilmek,

- Kaplamaların her bakımdan performansını yükseltmek,
- Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak.

Üstyapı kaplamasından beklenen, ancak klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan bu özelliklerden, söz konusu proje için özellikle hedeflenenlerin sağlanabilmesi, günümüzün teknolojik olanakları da kullanılarak, bağlayıcının yada karışımın katkı maddeleriyle modifiye edilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir.

Bitüm katkı maddelerinde aranılan özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- Kolay elde edilebilmelidir,
- Asfalt karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
- Asfalt ile homojen olarak karışabilmelidir,
- Asfaltın yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır,
- Düşük sıcaklıklarda ise asfaltın çok kırılgan veya sert olmamasını sağlamalıdır,
- Ekonomik olmalıdır.

Katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenir:

- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini korumalıdır,
- Uygun ekipman ile işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır,
- Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilmeli ve agregayı sarabilmelidir.

4.3. Modifiye Yöntemleri

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

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

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

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

4.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 4.1’ de verilmiştir:

Ancak, son yıllarda kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve modifiye karışımlar konusundaki çalışmalar ve yayınlar da farklı tip katkı maddelerinin mukayesesinden katkı maddesi olarak polimerlere ilginin arttığı, hatta bitüm katkı maddeleri sınıflandırılırken polimerler esas alınarak, polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu şekildeki bir sınıflandırmaya göre bitüm modifikasyon tipleri Tablo 4.2 'de verilmiştir.

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bitüm özellikleri üzerindeki etkisi Tablo 4.3’ te, bundan ayrı olarak bitümlü karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri Tablo 4.4’ te verilmektedir. Belli başlı üstyapı problemlerine karşı, bağlayıcı ve üstyapı karışımının iyileştirilmesi için, yukarıdaki sınıflandırmalarda görülen ve yaygın olarak kullanılan modifiyerler Tablo 4.5’te verilmektedir.

Tablo 4.1. Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması.

TİP		ÖZELLİKLER	Modifiyerlerin Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Etkisi
1- Filler		Mineral Filler: Taş tozu Kireç Portlant çimentosu Uçucu kül Karbon siyahı Sülfür	Sertleştirme
2- Ekstender (genleştirici)		Sülfür Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
Kauçuk Doğal Lateks Yapay Lateks Blok kopolimer İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	Doğal kauçuk Stiren-butadiyen veya SBR Stiren-butadiyen-stiren veya SBS Dönüştürülmüş kauçuk	*
4- Plastik		Polietilen Polipropilen Etil-vinil-asetat. EVA Polivinil klorür PVC	Sertleştirme
5- Bileşim		3 ve 4'deki polimerin karışımı	*
6- Fiber		Doğal : Asbest taş yünü Yapay : Polipropilen polyester fiberglas	Sertleştirme
7- Oksidan		Manganez tuzu	Sertleştirme
8- Antioksidan		Kurşun karışımları Karbon Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9- Hidrokarbon		Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya sertleştirme
10- Soyulma önleyici		Aminler Kireç	Yumuşatma

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

Tablo 4.2. Bitüm Modifikasyon Tipleri.

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer olmayan katkıyla modifikasyon 1-Filler 2-Soyulma önleyici katkıları 3-Ekstenderler 4-Anti-oksitanlar 5-Organometal bileşimleri 6- Diğerleri	Kil. karbon siyahı, uçucu kül Organik aminler ve amidler Lignin, sülfür Çinko anti-oksitanlar, kurşun anti-oksitanlar, fenolikler. aminler Organomanganez bileşimleri Organokobalt bileşimleri
II. Polimer Modifikasyon 1-Plastikler a-Termoplastikler b-Termosetler 2-Elastomerler a-Doğal kauçuklar b-Yapay elastomerler 3-İşlenmiş kauçuklar 4-Fiberler *	Polietilen (PE). Polipropilen (PP) Polivinil klorür (PVC). Polistiren (PS) Etilen vinil asetat (EVA). Epoksi reçineler, polyester reçineler Sentetik-butadien kopolimer (SBR) Stiren-butadien-stiren kopolimer (SBS) Etilen-propilen-dien terpolimer (EPDM) İsobüten-isopren kopolimer (IIR) Polyester fiberler, polipropilen fiberler

*Bazı başlıca fiber malzemeleri Tablo 4.3’da verilmektedir.

Tablo 4.3. Bazı Başlıca Katkı Malzemeleri.

Modifiyer	Etkilenmiş Özellik
Yağ	Bitümün yapısı Bağlayıcılık Viskozite Penetrasyon değeri Yumuşama noktası
Filler tozu	Yumuşama noktası Viskozite Sertlik Yoğunluk Maliyet Mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik Çatlak direnci Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak) Sertlik (soğuk) Bağlayıcılık Adezyon
APP (Ataktik polipropilen) EVA (Etilen vinil asetat)	Sertlik Penetrasyon değeri Fraass kırılma noktası Yumuşama noktası
SBS (stiren-butadien-stiren)	Penetrasyon değeri Yumuşama noktası Elastik geri dönüş Düşük sıcaklık kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite Islatma kabiliyeti Uygulama sıcaklığı

Tablo 4.4. Değişmiş Sonuç Özellikleri İle Bazı Yaygın Kullanılan Modifiyerler Arasında İlişki.

Kimyasal Katkılar	Kimyasal Katkıların Rolü								
	Yaşlanma Sertliğini Azaltma	Rutubet Zararı Hassasiyetini Azaltma	Agrega Bağlayıcı Değişikliği	İşlenebilirlik Gelişimi	Adezyon Gelişimi	Stabilitede Artma	Tekerlek İzi Direncinde Artma	Soyulmaya Karşı Özelliklerinde Gelişme	Gevreklikte Artma
Hidrate Kil	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Portland Çimentosu				✓	✓	✓	✓		
Manganez Modifiyesi			✓	✓	✓		✓	✓	✓
Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	✓	✓		✓	✓	✓			
Sülfür				✓		✓	✓		✓
Organik Polimerler				✓		✓	✓		

Tablo 4.5. Üstyapı Problemlerine Karşı Üstyapının İyileştirilmesi İçin Kullanılan Modifiyerler.

Problem Türü	Modifiyerler
Yaşlanma	SBR (Stiren-butadien) Oksidan Antioksidan Mineral fiber
Yorulma	SBR (Stiren-butadien) EVA (Etil vinil asetat) Oksidan
Kalıcı deformasyon	SBS (Stiren-butadien-stiren) Mineral filler
Isısal çatlamlar	SBS (Stiren-butadien-stiren) Ekstender (Genleştirici)

4.4.1 Filler

Mineral filler, agregaların kırılıp elenerek küçük parçalara ayrılması sonucunda meydana gelen mineral tozlan, uçucu kül, portland çimentosu ve kireçlerden oluşur. Fillerin BSK'da geleneksel olarak kullanılmasının amacı sertliği veya güçlendirmeyi sağlamanın yanı sıra agreganın dağılımındaki boşlukların doldurulmasıdır. Fillerin katılmasıyla, genelde bir güçlenme ve takviye durumu söz konusu olmakla birlikte asfalt karışımının tümünde bir performans ve davranış gelişmesi görülür. Filler malzemesinin miktarı genellikle filler/bitüm oranı şeklinde ifade edilir ve karışım dizaynının bir parçasını meydana getirir.

Önemli noktalardan biri de fillerin mineralojik tipleri ve dane dağılımlarıdır. Genel anlamda No 200 elekten geçen malzeme filler olarak adlandırılır. Filler sadece doğal agregalardan oluşmamakta, kireç, lignin, sülfür ve çok ince kesilmiş, ufalanmış fiber parçacıkları da filler olarak kullanılabilir. Fillerler

Filler grubu bazı maddeler ve bunların modifiyer olarak etkileri:

1-Kireç:

Etkileri:

- Yüksek sıcaklık viskozitesinde artış,
- Bağlayıcının zamanla sertleşmesinde azalma,
- Bağlayıcı-agrega arasındaki adezyonda artma,
- Karışımın rutubete direncinde artma,
- Karışımın sıcaklık hassasiyetinde gelişme,
- Stabilitede artma,
- Karışımın yaşlanma sertleşmesinde azalma.

2-Microfil 8:

Asfalt karışımlarında güçlendirici bir katkı olarak kullanılan karbon siyahı parçacıklarıdır. Bu ürün, karbon siyahı parçacıklarının yüksek yakıt emiş kapasitesiyle karakterize edilir, bu ise sıvı maddelerde viskoziteyi artırır ve dağılmayı kolaylaştırır.

Etkileri:

- Yüksek servis sıcaklıklarında arttırılmış viskozite ve sertlik ,
- Isı hassasiyetinde azalma,
- Oksidasyon sertleşmesinde ve gevrekleşmede azalma,
- Karışımın kalıcı deformasyon direncinde artma,
- Karışımın aşınma ve kaplama direncinde artma,
- Öngörülen servis süresinde uzama.

4.4.2 Ekstenderler (Genleştirciler):

Sülfür ve lignin gibi bazı maddeler asfalt çimentosunda genleştirci olarak kullanılır ve karışım içinde kısmi olarak asfalt çimentosu yerine bu malzemelerden herhangi biri koyulur. Genel olarak asfalt çimentolarına gireceği yüzdelere üst sınır % 30 ile % 50 arasında olmaktadır.

4.4.3 Kauçuklar

Lastik grubu (elastomerler) hem doğal hem de yapay kauçukların değişik şekillerinden meydana gelir. Bu malzemeler oda sıcaklığında getirilip tekrar bırakıldığında eski şekil ve boyutlarına geri dönerler. Kauçuk malzemeler doğal lateksler, yapay lateksler,

blok kopolimerler ve işlenmiş kauçuklar başlıkları altında toplanabilmektedirler. Yapay lateks malzemelerinin piyasada kullanılan birkaç çeşidi bulunmaktadır.

Kauçuk grubu bazı maddeler ve bunların modifiyer olarak etkileri:

1- Neopren (Sentetik Lateks)

Etkileri:

- Yüksek sıcaklık viskozitesinde iyileşme,
- Dayanıklılıkta (durabilitede) iyileşme,
- Elastiklikte iyileşme,
- Sıcaklık hassasiyetinde gelişme.

2-Rub-R-Road Latex (Sentetik Lateks)

Etkileri:

- Oksidasyon yaşlanmasında gecikme,
- Esnek yorulmaya karşı dirençte gelişme,
- Akmaya, oluklanmaya, ötelenme ve bükülmeye karşı dirençte gelişme,
- Adezyonda iyileşme,
- Sertlikte artma,
- Düşük sıcaklık düktilitesinde iyileşme,
- Yumuşama noktasında yükselme.

3-Rosphalt 50 (Sentetik Lateks)

Polimerik bir katkı maddesi olup, modifiyer olarak kullanıldığı karışımları güçlendirerek klasik karışımlara göre daha iyi performans kazanmalarını sağlar. Yüksek sıcaklık akmalarına karşı kullanılmaktadır. Rosphalt-50 katkısının kullanılmasının avantajlarından biride asfalt kaplama karışımlarının geçirimsizliğini sağlamasıdır.

Etkileri :

- Buz çözücü tuzların beton köprü tahliyelerine nüfuzunu önler,
- Ağır trafikli yollarda, daha ince tabaka yapma imkanı,
- Düşük sıcaklıklardaki çatlamalara karşı dirençte artma,
- Yüksek sıcaklıklardaki yumuşama ve akmada düşme,
- İç tabakalardaki yansıma çatlaklarını tutar,
- Trafik altında, daha kısa sürelerde uygulanabilir.

4-Kraton (Blok Kopolimer, Termoplastik Elastomer)

Kraton, termoplastik yapısından dolayı karıştırma işlemleri sırasında elastik özellikleri gösterir. Kraton D-1101 asfalt modifikasyonunda kullanılan tipik bir polimer olup bir SBS (Stiren-butadien-stiren) blok kopolimerdir. Bitüme katılacak Kratonun ağırlıkça % 5'i civarında olması istenir. Bu miktar % 3 iken de beklenen gelişmeler sağlanırsa da BSK'nın özelliklerine de bağlı olarak bazı durumlarda % 5'den daha yüksek orana gereksinim olabilir.

Etkileri:

- Düşük sıcaklıklarda arttırılmış esneklik,
- Yüksek ve geri dönebilir esneme,
- Penetrasyonda düşme, düşük sıcaklıklarda yüksek duktilite,

- Geliştirilmiş çekme mukavemeti,
- Isı hassasiyetinde düşme,
- Yüksek sıcaklıklarda akma ve deformasyon direncinde artış,
- Yüksek sıcaklıklarda sertlikte artış,
- Yorulma ömründe uzama,
- Yüzey aşınma direncinde artma.

5-Styrelf (Blok Kopolimer)

Etkileri:

- Deformasyonlara karşı geri dönüş elastikiyetinde gelişme,
- Yüksek sıcaklıkta daha sert, düşük sıcaklıkta daha esnek,
- Gerilme dayanımında gelişme,
- Adezyonda gelişme,
- Kalıcı deformasyonlara karşı dirençte artma,
- Sökülmeye karşı daha yüksek elastiklik ve yapışma kuvveti,
- Düşük sıcaklıkta yüksek esneklik,
- Yüksek kayma direnci.

6-İşlenmiş Kauçuk

Taşıt araçlarının tekerleklerinden elde edilen lastik atıkları 1960'lann ortalarından beri asfalt çimentosu katkısı olarak kullanılmaktadır. Malzeme işlenmemiş olarak kullanıldığı gibi bir dizi işlem sonucu da kullanılabilir ki buna dönüştürülmüş lastik

adı verilir. Asfalt çimentosuna ağırlıkça %15-25 eklenmesi durumunda asfalt lastiği adını alır.

Asfalt lastiğinin BSK'da bağlayıcı olarak kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Asfalt lastiği ile modifiyeli karışımlarda; arttırılmış esneklik, yavaş yaşlanma, azaltılmış çözülme, genişletilmiş inşaat mevsimi, kalıcı deformasyonlara karşı arttırılmış dayanım özellikleri sağlanabilmektedir.

7- Asphalt Rubber (İşlenmiş Kauçuk)

Sıcak asfalt çimentosunun % 20 (± 4) oranında atık lastik kırıntıları ilavesiyle modifikasyon yapılır.

Etkileri :

- Yaşlanmaya karşı iyileşme. Yaşlanmanın azalmasındaki etken lastik parçacıklarının içerdiği karbon siyahı ve antioksidan sistemleridir,
- Yaşlanma nedeniyle sertleşmenin azalması sonucu kaplama çatlaklarında azalma,
- Elastiklikte artma,
- Yumuşama noktasında yükselme. Bunun sonucundaki yüksek sıcaklık stabilitesi, akma dayanımı ve deformasyona karşı direnç,
- Kırılma sıcaklığında düşme.

8- Plusride Asphalt (İşlenmiş Kauçuk)

Etkileri:

- Yorulma ömründe yedi misli artma,
- Yüksek bitüm içerikli karışımlardaki sıcaklık terlemelerinde azalma,
- Bağlayıcı viskozitesinde artma; Yüksek sıcaklıkta stabilite artması,

- Kalıcı deformasyonlara karşı akma ve büzülme direnci,
- D    k sıcaklıklarda esneklik performansı,
- Mevcut rutubete ve sonradan nüfuz eden suya kar  ı direnç,
- Yansıma çatlaklarına daha uzun süreli direnç,
- Trafik g r  t s nde azalma,
- Islak yada buzlu ortamlarda daha yüksek kayma direnci,
- Daha iyi yüzey drenajı.

9- CariphalteDM (SBS Kopolimeri)

Shell firmasının bir ürünü olup, termoplastik kauçuk (TR) olarak anılırlar. Stiren-butadien-stiren (SBS) veya Stiren-isopren-stiren'in polimerizasyonunu müteakip bir i lemlle imal edilirler. Zayıf beton altyapısı veya eski beton yolların üzerine yoğun sıcak karışımlarda ve BSK'larda kullanılmaktadır.

Etkileri:

- Kalıcı deformasyonlara kar  ı direnç,
- D    k sıcaklıklarda esneklik,
- Çatlama ve da ılmalara kar  ı direnç,
- Yüksek sıcaklıklarda sertlik.

10- Cariphalte DA (SBS Kopolimeri)

Shell firmasının geçirgen makadam ve sürtünme tabakalarında kullanılmak üzere ürettiği bir SBS kopolimeridir.

Shell ile Ulaştırma ve Yol Araştırma Laboratuvarı (TRRL) tarafından yapılan tekerlek izi testleri ile, Cariphalte DM SBS polimer modifiyeli asfalt karışımının deformasyona karşı direncinin ne derece iyileştiği tespit edilmiştir.

4.4.4 Plastikler

Basınç ve gerilme sonucu akma özelliği gösteren polimerik malzemelerdir. Plastikler genellikle termoset materyallerdir (ısıtılıp basınç ve gerilmeye maruz kalınca akan, fakat bir kez soğutulunca bir daha yumuşamayan malzemeler).

Plastiklerin sınıflandırılmasında ana bölümler şunlardır:

- 1- Homopolimerler:
 - a- Polietilen
 - b- Ataktik Polipropilen
- 2- Tesadüfi Kopolimerler
 - a- Etil vinil asetat (EVA)

Plastik grubu bazı maddeler ve bunların modifiyer olarak etkileri:

1- Elvax (Reçine)

EVA, 150°C sıcaklıktaki asfalt çimentosuna kuru ağırlık olarak % 2-4 oranında eklenir.

Etkileri:

- Yüksek sıcaklıklardaki viskozitede azalma,
- Sıcaklık hassasiyetinde azalma,
- Dayanımda artış,
- Yüksek sıcaklıklarda, deformasyona karşı dirençte artma,

- Düşük sıcaklıklarda, aşınmaya karşı dirençte artma.

2- Novophalt (Polietilen)

Novophalt, asfalt çimentosuna yaklaşık %4-6 Polietilen katılarak elde edilir.

Etkileri :

- Klasik asfalt uygulamalarında uygunluk,
- Soyulmada azalma,
- Yüksek sıcaklıklardaki deformasyonlarda azalma,
- Geniş bir sıcaklık aralığında elastiklikte iyileşme,
- Daha iyi servis ömrü, onarım, maliyet değerleri,
- Yorulmaya karşı daha büyük mekanik direnç,
- Stabilitede yükselme,
- Sünme değerlerinde düşme,
- Petrol-yağ ürünlerinin dökülmelerinin zararlarında azalma,
- Bitüm agrega adezyonunda artma.

3- Polybilt

Bu polimerlerin tümü asfalt çimentosunun mukavemetini ve adezyon özelliğini geliştirmektedir. Genelde kullanılan modifiyer miktarı asfalt çimentosu ağırlığının %3-5'i civarındadır.

Etkileri:

- Düşük sıcaklıklarda kırılmalıklarda azalma,

- Yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sertlik modülü,
- Adezyonda artma,
- Yaşlanmada azalma,
- Çekme gerilmesinde artma,
- Yorulma ömründe artma,
- Yüzey aşınmasına karşı dirençte anma.

4.4.5. Kombinasyonlar

Polimerlerle bir çok kombinasyon mümkündür ve bu kombinasyonlar modifiye asfalt çimentosunda çok ince değişiklikler yaparak özel karakteristikler elde etmek için kullanılırlar.

4.4.6. Fiberler

Doğal, sentetik ve çelik fiber türleri BSK'da kullanılmaktadır. Fiberler sağladıkları güçlendirmenin yanı sıra çok ince ve küçük parçacıklar olarak bölündüklerinden dolayı agrega üzerindeki bitüm filmlerinin kalınlığı normalden fazla olmaktadır. Fiberlerin BSK'a katkıları kohezyon ve çekme mukavemeti özelliklerinde gösterdikleri iyileştirmelerdir. Fiberlerin, bitümün kimyasal modifikasyonunda herhangi bir etkisi yoktur, fakat net olarak BSK üzerindeki etkisi, sağlamlaştırmak ve güçlendirmektir.

4.4.7. Oksidanlar

Bu gruba katalist adı da verilmektedir, çünkü oksidan katkılı bağlayıcılarda genel eğilim sertleşmeyi hızlandırmaktır.

4.4.8. Hidrokarbonlar

Hidrokarbonlar; bitümlü bağlayıcıyı yumuşatmak için bağlayıcıya veya karışıma eklenen maddeleri ifade eder.

1- Geridönebilir maddeler

Bu maddeler geridönebilir modifiyeler, ıslah edici maddeler, yumuşatıcı maddeler ve gençleştirici maddeler olarak da bilinmektedir. Hidrokarbon ürünleri, günümüz asfalt çimentosu şartnamelerine uygun olacak şekilde asfalt çimentolarının fiziksel özelliklerini iyileştiren maddelerdir. Geridönebilir maddelerden bazıları yaşlı asfalt çimentosunun viskozitesini düşürerek sadece yumuşatıcı özellik gösterir. Diğerleri ise yeni asfalt çimentosunun fiziksel ve kimyasal özelliklerini yaşlı asfalt çimentosunda da ortaya çıkarma amacıyla kullanılır, bundan dolayı da gençleştirici maddeler olarak adlandırılırlar. Aşağıda belirtilen yağ çeşitleri geridönebilir madde olarak kullanılırlar:

- Yumuşatıcılar: asphalt flux oils, lube stock, lubricating oil, slurry oil,
- Gençleştiriciler: lube extracts, extender oils

2- Sertleştirici maddeler

Yumuşak asfalt çimentoları, viskozite arttırmak, penetrasyon düşürmek veya kendine özgü bir takım ihtiyaçları karşılamak amacıyla modifiye edilir. Yüksek asfalten konsantrasyonlu maddelerin ilavesi sertleştirme işlemi için bir yoldur.

Sertleştiricilere birkaç örnek:

- Doğal asfaltlar: Reçine (gilsonite), Trinidad göl asfaltı,
- Rafineri ürünleri: ROSE asfaltlar, endüstriyel asfalt çimentosu .

Hidrokarbon Sertleştirici maddelerin asıl kullanım sebebi asfalt çimentolarının fiziksel özelliklerini iyileştirmektir. Penetrasyon, viskozite ve sıcaklık hassasiyeti küçük miktarların eklenmesiyle ayarlanabilmektedir. Ancak %30-40'a kadar varan oranlarda kullanışlı olarak kullanılmaktadır.

4.4.9. Yol Uygulamalarında Kullanılan Polimerler

Polimer modifiye bitümler kısaca polimer bitüm olarak ifade edilmekte ve modifiye bağlayıcı “termoplastik malzemeleri, ısıyla sertleşen sentetik reçineleri, toz kauçuk veya bitümdeki elastomerleri” içermektedir.

4.4.9.1 Termoplastikler

Termoplastiklerin belirgin özelliği sıcakta yumuşaması ve soğukta sertleşmesidir. Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS) ve Etilen Vinil Asetat (EVA) gibi termoplastiklerin bazıları bitüm modifikasyonunda denenmektedirler. Bu malzemeler, bitümle karıştırıldığında, bitümün normal servis sıcaklığındaki viskozitesi ve sertliği artar.

Bunların çoğu bitüm elastisitesinde önemli artış yapmazlar ve sıcakta ayrılma eğilimi gösterirler, soğukta ise dağılma etkileri artar. Ancak EVA gibi etilen ve vinil asetat kopolimerleri bitüm modifikasyonunda geniş oranda kullanılmaktadır. Bu tip polimerler bitüm içinde kolaylıkla dağılırlar ve genellikle normal karıştırma ve uygulama sıcaklıklarında bitümle iyi uyum gösterirler.

4.4.9.2. Termosetler

Termoset malzemeler (termosettik reçineler) ise şebeke polimerlerin monomerlerden yada çapraz halkalı lineer ön polimerlerden direk oluşarak meydana gelmiştir. Bu ürünler erimez, eritilmez ve akamazlar. Isıtma kimyasal reaksiyonun bir sonucu olarak ağlaşmaya ve geri dönülmez bir dönüşüme sebep olur. Önemli termosetler alkidler, amino ve asitfonik reçineler, epoksiler, doymamış polyesterler ve poliüretanlar içerirler. Termosetler kuvvetli bir üç boyutlu ağ yapısına sahiptirler ve ısıtma ile akıcı koşullara dönüşmeyebilirler. Bu polimerler yol uygulamalarında direkt kullanılabilirler, ancak bunların maliyetlerinin yüksek oluşu buna engel olabilecektir.

4.4.9.3. Elastomerler

Tabii kauçuk (NR), poli-butadien (BR), polisopren (IR), isobutadien-isopren kopolimer (IIR), polikloropren (CR), stiren-butadien kopolimer (SBR) ve stiren butadien-stiren blok kopolimer (SBS) gibi elastomerler (kauçuklar) uzun süreden beri bitüm modifikasyonunda denenmektedir. Polimerler elastomeriktirler, bunların elastikliği, yük altında kaldıktan sonra yada yüksek bir sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, tamamen yada kısmi iyileşme sağlayarak, bunların başlangıçtaki boyutlarına dönmesine olanak sağlar. Bu tip polimerlerin açık etkisi elastomer ile kuvvet kazanmaktan ziyade bitümün viskozitesinde sağladığı artışlardır. Bunlara bir örnek te, bunların volkanize edilmiş (çapraz-zincirli) durumları olan lastik kırıntılarının yeniden kullanılmasıdır. Ancak bu tip malzemelerin, sıkı molekül yapıları nedeniyle bitüm içerisinde dağılması zordur. Elastomer malzemeler arasında, bitüm modifikasyonunda stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimerleri en dikkat çekenidirler. Bu polimerler elastik ve termoplastik özelliklerin ikisini de birleştirdiklerinden, yaygın olarak termoplastik kauçuklar (TR) olarak adlandırılırlar. SBS kopolimerler stiren-butadien-stiren triblok zincirlerden meydana gelmişler ve iki evreli bir morfolojiye sahip olup, bir polibutadien matriksi içerisindeki polistiren blokları ile küresel etkiler sonucu şekillendiği anlaşılmaktadır. Bu sert blok etkiler, elastomerik ağ şeklindeki fiziksel

Çapraz-zincir davranışını sterir. Ayrıca, bunlar yüksek gerilme kuvveti ve modülündeki ince-partikül kuvvetlendirme filleri olarak iyi dağılma davranışını sterirler.

Bu apraz-zincir yapısının etkisi, polistirenin geçiş sıcaklığını (yaklaşık 100°C) hızla azaltmak olmuştur. Soğukta polistiren etki alanı yeniden şekillenir ve sertliği ile elastikliği yeniden yapılır. SBS kopolimerlerinin yüksek sıcaklıklarda doğal termoplastik davranışını ve düşük sıcaklıklarda sürekli bir ağı sağlama yeteneğı, bunların bitüm modifiyerleri olarak dikkat çekmelerinin esas sebebidir. Bir SBS kopolimeri sıcak bitüme katıldığında o bitümde maltenleri absorbe eder ve bitümün başlangıç hacmine göre dokuz misli şişme sterir. Uygun bir SBS içeriğinde (genellikle %5-6 oranında) bitüme doğru bir sürekli-polimer-ağı şekillenmesi olabilecektir. Bitümün viskoelastiklik ve sıcaklık hassasiyeti gibi önemli özellikleri bu modifikasyonla değışmiş olacaktır.

4.4.9.4. Fiberler

Bir fiberin en dikkat çeken özelliğı onun lif şeklinde olmasıdır. Fiberler doğal ve yapay olmak üzere iki alt kategoriye ayrılabilir. Bazı başlıca fiberler Tablo 4.3.de rölmektedir. Bir fiberin ana malzemesi polipropilen ve poliüretandır. Fiberler, geleneksel olarak, çatı kaplamalarında ve endüstriyel su tutucu mastikler için kuvvetlendirici ve sertleştirici katkıları olarak kullanılmaktadırlar, ancak son zamanlarda yol bağlayıcılarının modifikasyonunda da denenmektedirler.

5. ATIK LASTİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Üretim ve kullanım faaliyetleri sonucu ortaya çıkan, insan ve çevre sağlığına zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı biçimde alıcı ortama verilmesi sakıncalı olan her türlü maddeye atık denilmektedir [TS 118 EN 1426, 2002].

Gün geçtikçe artan atık sorununun tamamıyla çözümü için tek bir yaklaşım yeterli değildir. Ancak tüm yöntemlerin kombinasyonu ile etkin bir atık yönetimi sağlanabilir. Uluslar arası düzeyde kabul gören bu yaklaşım, “Entegre Atık Yönetimi” anlayışının benimsenmesine yol açmıştır. Entegre atık yönetiminde, atık yönetiminin tüm unsurları bir bütün olarak değerlendirilerek hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğin sağlanması hedeflenir. Bu çerçevede, entegre atık yönetiminin yalnızca tek bir atık türüne veya tek bir kaynağa yönelik olması beklenemez. Verimli ve entegre bir atık yönetim sistemi başlıca aşağıdaki özellikleri taşımalıdır [Pereira vd.,2006].

Bütüncül bir sistem olmalıdır: Entegre atık yönetimi bir yerleşim merkezinde oluşan atığın bileşimini oluşturan bütün maddeleri ve üretim kaynaklarını ihtiva edecek şekilde planlanmalıdır [Pereira vd.,2006].

Ekonomik değer oluşturabilmeli: Katı atık sisteminden sağlanabilecek ekonomik değerler, geri kazanılabilir malzeme, kompost ve elde edilebilecek biyogaz (düzenli depolama ve anaerobik kompost) ve benzeri kaynaklı girdilerdir. Bunlardan temin edilecek gelir, piyasa şartları ve yapılacak yatırımın maliyeti ile yakından ilgilidir. Bu sebeple planlama aşamasında ekonomik analizin çok iyi yapılması gereklidir [Pereira vd.,2006].

Esnek olmalı: Entegre atık yönetim sistemi, çevresel, mekânsal ve atık özelliklerinde zamana bağlı olarak meydana gelebilecek çeşitli değişikliklere uyum sağlayabilecek esneklikte olmalıdır. Bölgesel planlama yapılmalıdır: Planlamanın verimli olması, toplanacak atık miktarına bağlıdır. Atık oluşum miktarı ise öncelikle nüfusa bağlıdır. Bu sebeple Büyükşehirler dışındaki yerleşim alanlarında bölgesel planlamalar yapılmalıdır.

Bazı araştırmacılar entegre bir yönetime bağlı nüfusun 500.000 kişiden az olmamasını tavsiye etmektedir [Pereira vd.,2006] .

5.1. Atık Lastikler

Otomotiv sektörünün, dünya ve Türkiye için üretim ve satış değerleri göz önüne alındığında, ülkelerin sanayileri için ne kadar itici bir güç olduğu kolayca anlaşılabilmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu 2012 Ekim ayı sonu verilerine göre Ülkemizde trafiğe kayıtlı toplam 16 milyon 901 bin 785 adet taşıtın yüzde 50,6'sını otomobil, yüzde 16,4'ünü kamyonet, yüzde 15,7'sini motosiklet, yüzde 8,9'unu traktör, yüzde 4,4'ünü kamyon, yüzde 2,3'ünü minibüs, yüzde 1,4'ünü otobüs, yüzde 0,2'sini ise özel amaçlı taşıtlar oluşturmaktadır. Artan nüfus sayısı ile birlikte üretilen araçların da her geçen yıl artacağı beklenmektedir. Bu durumda, üretilen araçlarla beraber taşıt lastiklerinin kullanımının da artacağından şüphe yoktur.

Türkiye’de lastik üretimi 40 yıllık bir geçmişe sahiptir. Goodyear 1963 yılında Lassa 1974 yılında Petlas 90’lı yıllarda lastik üretimine başlamışlardır [URL-3; URL-4]. Ancak, lastiklerin belirli bir ömrü vardır. Bu ömürlerinin dolmasıyla beraber, lastik atık lastiğe dönüşmektedir. Lastikler araç altından söküldükten sonra ya kullanılmış lastik ya da ömrünü tamamlamış lastik olurlar. Lastiklerin dış derinliği belirli bir milimetreye (binek araç lastikleri için 1.6 mm) düştüğü zaman lastiklerin araç altında kullanımı tehlikelidir

Her lastik üç ana üründen oluşur.

- Kauçuk
- Çelik
- Lif ve diğer atıklar

Bunların lastik içindeki yüzdesel payları Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Rakamlardan anlaşılacağı gibi atık lastiğin ortalama %95’i geri dönüştürülebilen ürünlerden oluşmaktadır. Şekil 5.1’de bir lastik kesiti, görülmektedir.



Şekil 5.1. Araç Lastiklerinin Yapısı [URL-5].

Tablo 5.1. Araç lastiği üretiminde kullanılan tipik malzemeler [URL-5].

Ürün Cinsi	Kamyon Lastikleri	Araba Lastikleri
Kauçuk	% 70	% 70
Çelik	% 27	% 15
Lif ve Diğer Atıkları	% 3	% 15

5.2. Kauçuk Ve Lastik Geri Kazanımı

Geri kazanım konusu son 10 yıl içinde önem ve hız kazanırken, lastik geri kazanımında durum çok farklıdır. Kauçuk değerli bir hammadde olduğu için geri kazanımı üretimi kadar eskidir. 19. yüzyıl başında ortalama olarak kauçuğun %50'si geri kazanılıyordu. Zaman içinde petrolün bollaşması, sentetik kauçuk üretimi ve lastik teknolojisindeki gelişmeler kauçuk geri dönüşümünü olumsuz etkilemiş ve bu oran 1960'lı yıllarda %20'lere gerilemiştir. 1990'lı yıllarda lastik ve kauçuk endüstrisinde geri dönüşüm oranı %2'ye düşmüştür [Reschne ve Kurt, 2004]. Geri dönüşüm oranındaki büyük düşüş sonucu doğrudan çöpe atılan lastik sayısı milyonları ve hatta milyarları

bulmuştur. Örneğin; A.B.D. kanunsuz bir şekilde çöpe atılmış olan birikmiş atık lastik sayısının 2 veya 3 milyar olduğu tahmin edilmektedir. AB üye ülkelerde birikmiş atık lastik sayısının da bu civarda olduğu öngörülmektedir [Reschne ve Kurt, 2004]. Türkiye’de ise bu sayı tam olarak bilinmemekle beraber milyonlar civarında olduğu düşünülmektedir. Bazı ülkelerdeki kullanılmış araç lastiklerinin yönetimi Tablo 5.2’de verilmiştir.

Genel olarak atık lastikler 4 farklı şekilde değerlendirilebilirler:

1-Doğrudan Değerlendirme: Lastiklerin hiçbir işleme tabii tutulmadan oldukları gibi inşaatlarda, oyun parklarında, gemi tamponu yapımı, motorlu spor alanları, iskelelerde, toprak erozyonu önlemede, zeminin su oymasına karşı köprü ayaklarının kaplanması, araç park alanları, deniz kıyısında dalga kırıcı olarak ve şev korumasında, ayakkabı yapımında kullanılmasıdır. Atık lastikler doğrudan değerlendirmede, lastiği oluşturan kauçuk, çelik ve lifler ayrıştırılır ve hepsi malzeme olarak ayrı ayrı yeniden kullanılabilir. Bunun yanısıra atık lastikler yeniden kaplanıp lastik olarak kullanılabilir. Kaplama lastikler, yeni lastiklerden %50 daha ucuz olmaktadır. Uçak ve kamyonlarda kaplanmış lastik kullanımı yaygındır. Kamyon lastikleri 2 ile 4 kez, uçak lastikleri ise 10 kereye kadar kaplanabilir şekilde üretilmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan kamyon lastiklerinin %40’ı kaplanmış lastiktir.

2-Kauçuğu Granül Haline Getirme: Granül kauçuk yeni lastik üretiminde, ayakkabı taban imalatında, poliüretan köpük üretiminde, gürültü kirliliğini önlemek için yapılan panel imalatında, yol yapımında, set ve hendek yapımında, spor ve oyun sahaları ile liman inşaatlarında kullanılabilir.

3-Termik Değerlendirme: Kauçuğun kaliteli bir kömüre eşdeğer enerji değeri vardır. Bu yüzden yakıt olarak da kullanılmaktadır. Avrupa, ABD, Japonya ve Türkiye’deki çimento fabrikalarında yakıt olarak kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca ABD ve Avrupa’da elektrik üreten termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu yakma işlem sırasında zehirli gazlar açığa çıkmaktadır. Bu nedenle insan sağlığına zarar veren ve çevre kirliliği yaratan bir yöntemdir.

4-Hammaddesel Değerlendirme: Hurda Lastik Yönetim Konseyi'ne göre (Scrap Tire Management Council) bir lastik ortalama 4 litre yağ, 3 kg. karbon siyahı, 1.5 kg gaz, 1 kg. çelik ve kül üretir. Elde edilen yağ ve gaz düşük kaliteli yakıt olarak yeniden kullanılır. Çelik de yeniden kullanılmaktadır. İşlem sırasında insan sağlığına zarar veren ve çevre kirliliği yaratan zehirli gazlar açığa çıktığından doğayla uyumlu bir yöntem değildir.

Tablo 5.2. Bazı Ülkelerde Kullanılmış Araç Lastiklerinin Yönetimi [Gönüllü,2004].

Bertaraf Yöntemi	Fransa	Almanya	İtalya	İngiltere	Belçika	Hollanda	İsveç	ABD
	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1994
Yeniden Kaplama(%)	20	17,5	22	31	20	60	5	0
Geri Kazanma (%)	16	11,5	12	16	10	12	12,5	28
Enerji Elde Edilmesi (%)	15	46,5	23	27	30	28	64	72
Atık Deposuna(%)	45	4	40	23	5	0	5	0
İhracat (%)	4	16	2	2,5	25	0	7	0

Bütün haldeki hurda lastiklerin geri kazanılma uygulamaları:

- Motorlu spor alanları
- Deniz kıyısında gemi yanaşma noktaları
- Toprak erozyonu önlemede
- Zeminin su oymasına karşı köprü ayaklarının kaplanması
- Araç park alanları

- Deniz kıyısında dalga kırıcı olarak
- Su ortamlarında canlı yaşamının gelişmesi için bentik alanda
- Şev stabilizasyonunda (çelik teller ile birbirine bağlanmış olarak)
- Yol stabilizasyonunda (çelik teller ile birbirine bağlanmış olarak)
- İri parçalar haline getirilen hurda lastiklerin kullanıldığı alanlar:
- Çöp depo yerinde sızıntı suyu toplama tabakası teşkili
- Çimento fabrikalarında yakıt olarak
- Elektrik üretimi maksatlı termik santrallerde yakıt olarak
- Isı, buhar ihtiyacı için kağıt vb. endüstriyel sektörlerin kazanlarında yakma
- Kırıntı ve toz haldeki kullanım alanları çok daha geniş olup, aşağıda sıralanmıştır:

- Otomobil Endüstrisinde:

- Kayışlar
- Oto fren balatasında bağlayıcı
- Oto tamponları
- Araba kaportasında sızdırmazlık contaları
- Araç içi paspaslar
- Contalar
- Darbe absorblayıcılar
- Teker arkasında çamur/su sıçramasını önleyen lastik perdeler
- Araç lastikleri ve İç lastikler
- Gemi raspa malzemesi

- Spor Alanları Yüzeylerinde:

- Atletizm parkuru
- Golf ilk vuruş alanları
- Kreş oyun alanları
- Rerkreasyon alanları
- Çim bowling alanları
- Tekne içinde kaymayı önleyici yüzey
- Okul spor alanları
- Yüzme havuzu çevresi ve bahçe içi yollar
- Tenis ve basketbol sahaları
- Yürüyüş parkurları

- İnşaatlarda ve İnşaat Malzemesi Üretiminde:

- Tutkallar ve izolasyon sıvıları
- Teneke içi reçine kaplaması
- Halı tabanı
- Genel ekstüzyon ürünleri
- Genel döküm kalıp ürünleri
- Baraj, depo, havuz, atık bertaraf sahası ve çatı sızdırmazları ve örtüleri
- Paspaslar
- Bina zemin kaplamaları
- Su basmanı su önleyici

- Contalar
- Hastane, endüstri ve banyo zeminleri Insulation
- Kümes hayvanı altlıkları
- Kaymayı önleyici yüzey malzemesi
- İnşaat boyası
- Bağlantı noktası briketi
- Zemin yükseltme
- Çatı kiremitleri
- Vibrasyon gidericiler
- Çatı ve duvarlarda su izolasyon madde

- Zemin ve Asfalt Uygulamaları:

- Drenaj boruları
- Civa ve metalik yüzeyler için filtreleyici malzeme
- Poro sulama boruları
- Demiryolu ray bağlantıları
- Karayolu inşası ve tamiri
- Asfalt yol çatlakları kapama malzemesi
- Karayollarda lastik katkıli asfalt
- Toprak iyileştirici ve zemin örtüsü
- At yarış pisti malzemesi
- Toprakaltı drenajı

- Malzeme yönlendirme bacaları dağıtma zemini
- Trafikte araç ve insan geçiş barikatları

- Termoplastik Elastomerik Ürünler:

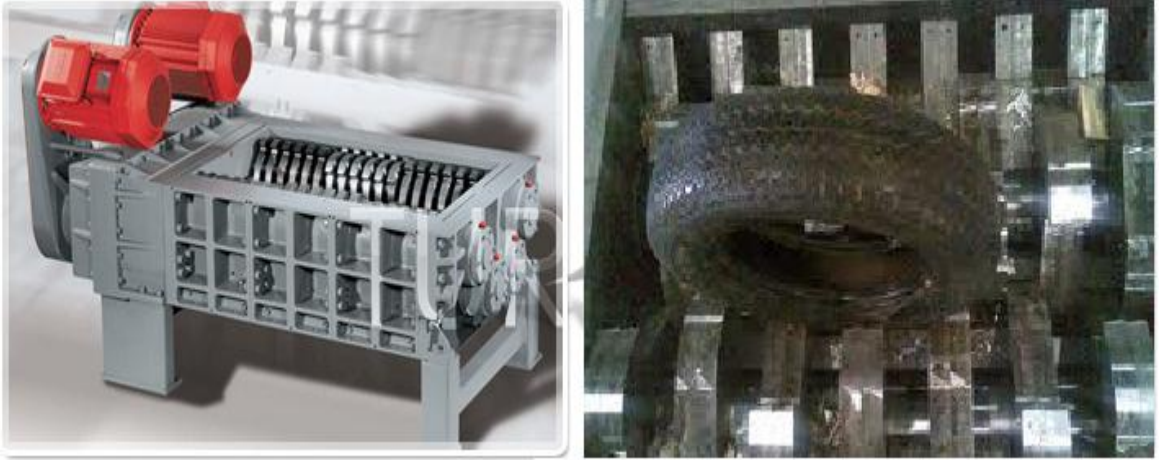
- Oto parçaları
- Radyo, TV vs. parçaları
- Kablo yalıtkanı
- Halı kayma önleyicileri
- Boru biçimli çekme malzeme
- Esnek lastik uygulamaları
- Dökümle şekillendirilmiş inşa ürünleri
- İzolasyonlar
- Yarı havalı tekerler
- İçi dolu endüstriyel tekerler
- Tepsiler, bidonlar ve kutular

5.3. Atık Lastikleri Parçalama Yöntemleri

Atık lastiklerin boyutlarının küçültülmesinde kullanılan yöntemleri; kullanılan makine ve makine gruplarının çalışma teknolojileri açısından, mekanik parçalama yöntemi ve nitrojenle parçalama yöntemi olarak iki temel başlıkta incelemek mümkündür [Yeşilata vd.,2007].

5.3.1. Mekanik Parçalama Yöntemi

Mekanik yollarla atık lastiklerin parçalanarak boyutlarının küçültülmesi işlemidir. Atık lastikler, ilk aşamada genellikle 5 cm boyutunda parçalanır. Bu işlemle, atık lastiğin hacmi küçültülerek depolama hacminin ve taşıma maliyetleri de düşürür. Bu işlemin en büyük faydası, ufaltılmış lastiklerin standart yükleyiciler ile yüklenebilmesi kolaylığı sağlamasıdır. Ön parçalama işleminde kullanılan makinelerin büyük çoğunluğu, düşük devirlerde karşılıklı olarak dönen iki milden oluşmaktadır. Bu tip sistemlerde, millerde oluşan yüksek tork yardımıyla her türlü atık lastik kolaylıkla parçalanabilmektedir. Atık lastik içerisindeki çelik teller, parçalayıcı ve öğütücü makinelerdeki yırtılma ve aşınmanın %70'ni oluşturduğu için, atık lastikleri parçalama işlemi başlamadan önce, çelik tel kısımlarının ayrıştırılması gereklidir [Yeşilata vd.,2007]. Şekil 5.2' de lastik öğütme tesisinden görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.2. Lastiğin Mekanik Olarak Parçalanması [URL-5].

Atık lastikler ön parçalayıcıda 5 cm boyutunda kesildikten sonra, çapı 10 mm'den daha küçük olan granül haline getirilmektedir. Granül oluştuktan sonra, manyetik bir sistem kullanılarak atık lastiğin içerisindeki çelik teller, sallama ve rüzgâr elekleri yardımıyla da elyaflar ayıklanmaktadır. Bazı uygulamalarda kullanılmak üzere; tane çapı

daha küçük olan lastikler elde etmek için, ardışık öğütme işlemi de uygulanabilmektedir [URL-5].

5.3.2. Nitrojenle Parçalama Yöntemi

Nitrojenle parçalama yönteminde, atık lastiği parçalama işlemi düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır. Gevrek yani kırılgan hale getirilen lastik, daha sonra mekanik olarak parçalanmaktadır. Nitrojenle parçalama yöntemiyle lastik geri kazanımı işleminde, lastik veya lastik parçacıkları -80°C 'nin altında soğutulmakta ve lastiğe cam gibi kırılganlık özelliği verilmektedir. Soğutma işlemi uygulandıktan sonra, lastiği ezerek veya kırarak lastik boyutu küçültme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tür boyut küçültme işleminde ortam sıcaklığında yapılan boyut küçültme işlemine kıyasla, daha az enerjiye ve daha az makineye gerek duyulmaktadır. Nitrojenle parçalama işleminin bir diğer avantajı da, atık lastik içersindeki çelik ve elyaf kısmının ayrılmasının kolaylığı ve bunun sonucunda da daha temiz bir ürünün elde edilebilmesidir. Ancak sıvı azot fiyatının yüksek olması, bu sistemin zayıf yanlarından biri olarak ortaya çıkmaktadır [Yeşilata vd.,2007].

5.4. Atık Lastiklerin Bitümlü Karışımlarda Kullanımı

Bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir başka katkı maddesi de kauçuktur. Kauçuk, bir izopren türevi olan çok sayıda yalın molekülün, hep aynı geometrik düzenle birleşmesi sonucunda oluşmuş bir makromoleküldür. Kauçuklar doğal ve sentetik olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Doğal kauçuk genel olarak sis – 1,4 poliizoprenden oluşmaktadır ve Hevea Braislien ağacından süzülen lateksden elde edilmektedir. İzopren polimerin yüksek molekül ağırlığına sahip olanı, doğal kauçuğu oluşturmakta ve bu polimeri içeren doğal kauçuk basınca duyarlı yapıştırıcı yapımında kullanılmaktadır [KSÖİK, 2006]. Bütadien, akrilonitril, kloropren, stiren gibi bazı doymamış (çifte bağ ihtiva eden) organik bileşiklerle sentetik kauçuk elde edilebilmektedir. Sentetik kauçuklar, doğal kauçuğun niteliklerine sahip olmamakla

beraber çok miktarda üretilip dolgu lastiklerde kullanılmaktadır. Önemli sentetik kauçuklar, bütadien kauçuğu (BR) , stiren-bütadien kauçuğu (SBR), nitrol-bütadien kauçuğu (NBR), izobutilen-izopropilen kauçuğu (IBR), izobutilen-izopren kauçuğu (IIR) sayılabilir [Özden ve Türer, 2005]. Sentetik kauçuk en çok araç lastiklerinin üretiminde olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Kauçuğun asfalt karışımlarda kullanılabilirliği, kullanılmış araç lastiklerinin içindeki kauçuğun geri kazanımını ön plana çıkarmıştır. Bu şekilde hem atık olan bir malzeme değerlendirilmiş hem de esnek kaplamanın özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır. Kauçuğu geri kazanmak için en yaygın uygulanan yöntem 1899'da geliştirilmiş olan bir alkali yöntemidir. Bu yöntemde öğütülmüş hurda lastik, seyreltik kostik çözeltide ısıtılır ardından yıkanarak, içerdiği dokuma maddelerindeki selüloz ve kostik uzaklaştırılır. Daha sonra kurutulur ve merdanelerin arasından geçirilerek yaprak ya da levha haline getirilir. Bunun yanı sıra günümüzde ömrünü tamamlamış araç lastikleri çok düşük sıcaklıklarda kırılğan hale getirilerek de öğütülmektedir. Bir otomobil atık lastiğinin ağırlığı 9,1 kg'dır. Atık lastiğin yaklaşık olarak %35'i doğal ve %65' sentetik olan geri kazanılabilir kauçuktan meydana gelmektedir. Bir kamyon lastiği 18,2 kg ağırlığında olup, bu ağırlığın %60 ile %70'i geri kazanılabilir kauçuk içermektedir [Sugözü ve Mutlu,2009].

Hamzah ve ekibi, 80/100 penetrasyonlu saf bitümün ve parçalanmış atık lastikle modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini Dinamik Kesme Reometresi'nden (DSR) ile incelemiş ve ayrıca bu bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerini incelemiştir. Karışım numuneleri yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlanmıştır. Bu yaklaşım ile bitümün kompleks modülü ve karışımın sertliği arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta öğütülmüş araç lastiği ilavesinin orijinal bitümün $G^*/\sin\delta$ değerini artırdığını ve dolayısıyla daha uzun bir yorulma ömrü sunduğunu ve araç lastiği modifiyeli bağlayıcının yaşlanmadan daha az etkilendiği karışım numunelerinde ise öğütülmüş araç lastiği modifiyeli karışımların %24 daha yüksek Marshall stabilitesi %56 daha yüksek sünme rijitliği değeri verdiği ve daha düşük ısı hassasiyeti gösterdiği belirtilmiştir [Hamzah vd., 2006].

Navarro ve ekibi, ağırlıkça %9 atık lastik kauçuğu ile modifiye edilmiş bitümün, kullanım ve işleme (örneğin pompalama, karıştırma, sıkıştırma vb.) sıcaklıklarındaki davranışını ele almıştır. Çalışmada, kauçuk parçacığı boyutunun bir fonksiyonu olarak, atık

lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitümlerin (CTRMBs) mekanik özellikleri ve depolama dayanıklılığı araştırılmıştır. Öğütölmüş araç lastiği kauçuğunun bitüme eklenmesinin, yüksek servis sıcaklıklarında hem lineer viskoelastisiteyi ve viskoziteyi artırdığı hem de düşük sıcaklıklarda depolama stabilitesini azalttığı belirtilmiştir. Netice olarak, atık lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitümün, hem tekerlek izlerine, hem de yorulma çatlamalarına karşı direncini arttıran, gelişmiş mekanik özellikler sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca çözünmeyen, küresel olmayan parçacıkların varlığı, yüksek sıcaklıklarda gözlenen akış davranışını etkilemektedir. Sağlanan deneysel sonuçlardan, üretim işlemleri sırasında 0.35 mm'den küçük kauçuk parçacıklarının ve modifiye işleminde yüksek karıştırma hızlarının kullanılması tavsiye edilmektedir [Navarro vd., 2004].

Cooper, geleneksel bitümlü sıcak karışım, geri kazanılmış asfalt kaplamalar (RAP) ve öğütölmüş kauçuk (CR) içeren karışımların laboratuvar performansını araştırmıştır. Bu çalışmaya, Louisiana'da yaygın olarak kullanılan kalın taneli doğal kum ve silisli kalker agregalar dahil edilerek, toplam altı karışımın kıyaslı laboratuvar değerlendirmeleri incelenmiştir. Öğütölmüş kauçuk hem yaş proses olarak bitüm modifikasyonunda hem de kuru proses olarak direk karışıma ilave edilmiştir. Kauçuk oranı bağlayıcı ağırlığının %10'u olarak kullanılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde fiziksel ve reolojik testler uygulanmıştır. Bitümlü karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma davranışlarının belirlenmesi için yarım daire eğilme, dinamik modül, dinamik sünme ve modifiye edilmiş Lottman testleri uygulanmıştır. Sonuçta %40 oranında PG 64-22 seviyesinde geri dönüştürölmüş asfalt çimentosu ve %10 öğütölmüş kauçuk karışımının PG 70-28 gibi davrandığı, öğütölmüş kauçuk ilavesinin karışımların nem hassasiyetini azalttığını, bu karışımların iyi bir kırılma direnci sergilediğini, 54 °C'ye kadar lineer-viskoelastik bölgede kalabildiğini ve tekerlek izine karşı çok yüksek bir direnç gösterdiği belirtilmiştir [Cooper, 2008].

Wayne ve Magdy, bitümün öğütölmüş araç lastiği kauçuğu ile modifikasyonunda sıcaklık, süre karıştırma hızı ve katkı oranının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta düşük sıcaklıklarda polimerizasyonun uzun sürdüğü yüksek sıcaklıklarda ise çok kısa sürdüğü, karıştırma süresinde ise bir başlangıç periyodunun olduğu bundan sonra ise stabil bir yapı olduğu, bu başlangıç periyodunun ise kauçuğun kökeni ve boyutuyla ilgili olduğu, büyük

dane boyutlu kauçuklarda yüksek karıştırma hızının bu parçacıkların boyutunu küçülttüğü ve böylece modifikasyon sürecine yardımcı olduğu belirtilmiştir [Wayne ve Magdy, 2006].

Arabani ve ekibi, lastik lifi örgüsünün, asfalt kaplamasını takviye etmedeki kullanımını incelemiştir. Çalışmada, lastik lifi örgüsüyle takviye edilmiş asfalt kaplamasının çatlama potansiyeli değerlendirilmiştir. Sonuçlar lastik lifi örgüsü takviyesinin bakım ve rehabilitasyon maliyetlerini düşürürken, asfalt kaplamasının çatlama karşı direncini önemli ölçüde arttırdığını ve hizmet ömrünü yükselttiğini göstermiştir [Arabani vd., 2009].

Silvrano ve ekibi atık lastik kauçuğunu kuru proses olarak yani mineral agrega olarak karışıma ilave ederek bu karışımların rijitlik ve yorulma ömürlerini incelemiştir. Kauçuk oranı %2-%3,6 aralığında seçilmiştir.[Silvrano vd.,2005]. İyi bir karşılaştırma yapabilmek için kauçuk içermeyen saf karışım ve ıslak proses ile üretilmiş karışım numuneleri de hazırlanmıştır. Sonuçta kuru proses ile modifiye edilen karışımların saf karışımlara göre önemli ölçüde mekanik özelliklerde bir artış sağladığı tespit edilmiştir.

Pereira ve ekibi yaptığı çalışmada, biri laboratuvarında diğeri rafineride olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiş kauçuk modifiyeli bağlayıcı ile üretilmiş bitümlü sıcak karışımları incelemiştir. Çalışmada yoğun ve açık gradasyonlu karışımların yorulma ve kalıcı deformasyon davranışları incelenmiştir. Sonuçta rafineride hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların tekerlek izi dirençlerinin, laboratuvarında hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların ise yorulma ömürlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir [Pereira vd.,2006].

Weidong, atık lastik kirliliğini en aza indirmek ve asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirmek üzere laboratuvarında, kuru proses ile geri dönüştürülmüş lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş asfalt karışımlarının özelliklerini araştırmıştır. Farklı kauçuk miktarlarına sahip (toplam karışımın ağırlığı itibarıyla %1, %2 ve %3) üç tip asfalt karışımının ve kauçuksuz bir kontrol karışımı üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. 60 °C’de tekerlek izi ve, 10 °C’de dolaylı çekme deney sonuçlarına göre kuru proses ile lastik kauçuğunun ilavesi, asfalt karışımlarının mühendislik özelliklerini iyileştirdiği ve yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona, düşük sıcaklıkta çatlak oluşumuna karşı direnci artırdığı belirtilmiştir [Weidong ., 2007].

Silvrano ve ekibi atık lastik kauçuğu gradasyonunun kauçuk asfalt özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biri olduğuna dikkat çekmiş ve yaptıkları çalışmada atık lastik kauçuğu gradasyonunun penetrasyon, dönel vizkozite (Brookfield viskometresi kullanılarak), sertlik ve yumuşama noktası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test numuneleri, 50/70 penetrasyonlu saf bir asfaltla, ve temelde eski lastikleri ortam sıcaklığında yırtma ve ezmeye dayanan öğütme süreciyle elde edilmiş parça kauçukla üretilmiştir. Karıştırma süresi 60 dakika ve karıştırma sıcaklığı 170 °C olarak seçilmiştir. Sonuçlar dönel vizkozite ve sertliğin, parça kauçuktan en çok etkilenen özellikler olduğunu göstermiştir. Ayrıca kauçuk parçacıklarının yüzey alanının artmasının yani küçük boyuttaki parçacıkların viskoziteyi artırdığı, iri parçacıkların ise daha çok sertliği etkilediği belirtilmiştir [Silvrano vd.,2006].

6. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER

6.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler

6.1.1. Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri

Organik bir malzeme olan asfalt, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışınlardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek yaşlanma (sertleşme) eğilimi göstermektedir. Asfaltın yaşlanması, yapım boyunca meydana gelen “kısa süreli yaşlanma” ve servis hizmet ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca meydana gelen “uzun süreli yaşlanma” olmak üzere iki düzeyde gerçekleşmektedir. Superpave bağlayıcı şartnamesi, asfaltın kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) ile uzun süreli yaşlanmasını temsil eden Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyini gerekli görmektedir [Kennedy vd., 1994; Öztürk ve Çubuk, 2004]. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler Tablo 6.1’ de verilmiştir.

6.1.1.1. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)

Asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), AASHTO T240 veya ASTM D2872 şartnamelerine göre yapılmaktadır. Deneyde, ince bir film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıda, sıcaklık ve havanın etkisiyle uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve deneyden sonra yaşlanmış olarak elde edilen asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır [Tunç,2001; Kennedy vd.,1994; Zaniwski ve Pumphrey,2004; URL-6]. Deney aleti Şekil 6.1’de şematik olarak gösterilen elektrikle beslenen bir ısı iletim sistemi bulunan 163 °C’lik ısıya sahip bir etüv, etüvün içerisine silindir cam şişeleri yerleştirmek için monte edilmiş dönen tablası bulunan bir taşıyıcı ve şişelere hava püskürtmeye yarayan bir hava üfleyici parçaya sahiptir.

Tablo 6.1. Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlanmasına Neden Olan Faktörler [McGennis vd.,1994].

Yaşlanmaya Neden Olan Etkiler	Meydana Geliş Sebebi				Meydana Geldiği Yer	
	Süre	Sıcaklık	Oksijen	Güneş Işığı	Yüzeyde	Kütlede
1. Oksidasyon	X	X	X	–	X	–
2. Fotooksidasyon (Direkt ışık)	X	X	X	X	X	–
3. Buharlaşma	X	X	–	–	X	X
4. Fotooksidasyon (Yansıyan Işık)	X	X	X	X	X	–
5. Foto Kimyasal (Direkt Işık)	X	X	–	X	X	–
6. Foto Kimyasal (Yansıyan Işık)	X	X	–	X	X	X
7. Polimerleşme	X	X	–	–	X	X
8. Yapı İçerisinde Gerçekleşen Yaşlanma (Tiksotropi)	X	–	–	–	X	X
9. Yağ Yayılması (Sineresis)	X	X	–	–	X	–
10. Nükleer Enerjideki Değişim	X	X	–	–	X	X
11. Suyun Etkisi	X	X	X	X	X	–
12. Agregat Tarafından Absorbe Edilme	X	X	–	–	X	X
13. Agregat Yüzeyinde Bileşenlerin Absorbe Edilmesi	X	X	–	–	X	–
14. Ara Yüzeyde Meydana Gelen Kimyasal Reaksiyonlar veya Katalizör Etkisi	X	X	–	–	X	X
15. Mikrobiyolojik Bozulma	X	X	X	–	X	X



Şekil 6.1. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT).

Deneyde kullanılacak 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış $35 \pm 0,5$ gram asfalt bağlayıcı numunesi doldurularak dönen tabla üzerine yerleştirilir ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika (TS EN 12607-1'e göre 75 dakika) süreyle döndürülür. Dönme esnasında etüvün en alt konumunda bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere akışı 4000 ± 200 ml/dakika olacak şekilde hava püskürtülür. Sıcaklık, dönme hareketi ve hava üfleme etkisiyle asfalt bağlayıcı şişe içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanmaktadır [Altaş, 2002; Zaniwski ve Pumphrey, 2004; URL-6; Dinç, 1999; National Asphalt Training Center ,1994].

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül (6.1) kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir [TS EN 12607-1, 2003].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (6.1)$$

Kütle kaybı; asfalt bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybından ibaret olup asfaltın taşıma, depolama, ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin bir göstergesidir [Tunç, 2001].

6.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)

Arazide servis sırasında bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuara yansıtılabilmek amacıyla SHRP-A-002A araştırma ekibi tarafından Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) yöntemi geliştirilmiştir [Christensen ve Anderson, 1992]. PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca asfalt bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir [Kennedy vd., 1994; Zaniwski ve Pumphrey, 2004]. Deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, asfalt numunesi bir basınç kabına konularak etüvde 20 saat süreyle standart sıcaklık ve basınç

etkisinde bırakılır. Deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcı, karıştırma ve yapım aşamasındaki yaşlanmayı temsil eden RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numunelerden alınmaktadır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşılabilecek çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır [Tunç,2001; Altaş, 2002; Öztürk ve Çubuk, 2004].



Şekil 6.2. Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV).

Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları, Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Bağlayıcı Sınıfına Göre Uygulanacak PAV Deney Sıcaklıkları [Zaniewski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994].

Bağlayıcı Sınıfları	PAV Deney Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100–110
PG 76-Y	100–110
PG 82-Y	100–110

RTFOT ve PAV deneyinden elde edilen numuneler Superpave deneylerinde kullanılmakta ve yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir.

Superpave bağlayıcı deneyleri, asfaltın performansını orijinal durum, karıştırma ve yapım aşaması ve servis ömrü aşaması olmak üzere üç etapta ele almaktadır. Asfalt bağlayıcının kullanım ömrü boyunca karşılaştacağı yaşlanma ile ilgili şartlar RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak sağlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalt numunelere aşağıda Tablo 6.3’ te belirtilen testler uygulanarak fiziksel özellikleri saptanmakta ve böylece gerçek şartlara benzeşim sağlanarak bağlayıcının performansı gerçekçi yaklaşımlarla saptanmaya çalışılmaktadır. Tablo 6.4’te Superpavedeki bağlayıcı deneylerinin kullanım amaçları verilmiştir.

Tablo 6.3. Superpave Bağlayıcı Performans Deneyleri ve Kullanılacak Numuneler [Altaş, 2002; Dinç, 1999; Orhan,2006].

Deney Adı	Performans Özellikleri	Kullanılacak Asfalt
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Kalıcı Deformasyon Yorulma Çatlağı	Orijinal Asfalt
		RTFOT Uygulanmış Asfalt
		PAV Uygulanmış Asfalt
Dönel Viskozimetre (RV)	Aktarma, Pompalama	Orijinal Asfalt
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Termal Çatlak	PAV Uygulanmış Asfalt
Doğrudan Çekme (DTT)	Termal Çatlak	PAV Uygulanmış Asfalt

Tablo 6.4. Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları [Asphalt Institute, 1996; Zaniewski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994; Zaniewski ve Nallamothu, 2003].

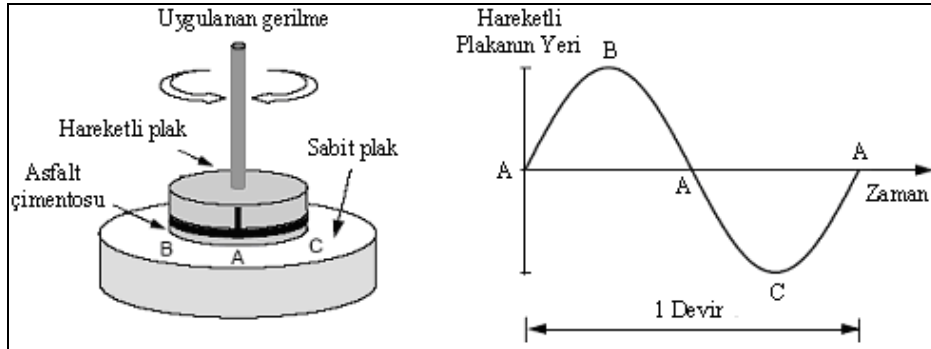
Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Fırını (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

6.1.2. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)

DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır [Zaniewski ve Pumphrey,2004]. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (sinüzoidal) yüklemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı test frekanslarında elde edilebilmektedir [Zaniewski ve Pumphrey,2004,APetersen vd.,1994]. DSR deneyinde, asfalt numunenin sinüzoidal gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının

kompleks kayma modülü (kayma sertliği) (G^*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır. Viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma modülü ve faz açıları, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır

DSR deneyinde asfalt numunesi Şekil 6.3'te görüldüğü gibi, sabit bir plaka ile sola ve sağa küçük dönme hareketleri (salınım) yapabilen bir plaka arasına sabit kalınlıkta yerleştirilerek belirli bir ısı altında döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya uygulanan gerilme veya deformasyon ile tabla A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra döner tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Döner tablanın bu hareketine bir devir denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir [Zaniewski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994].



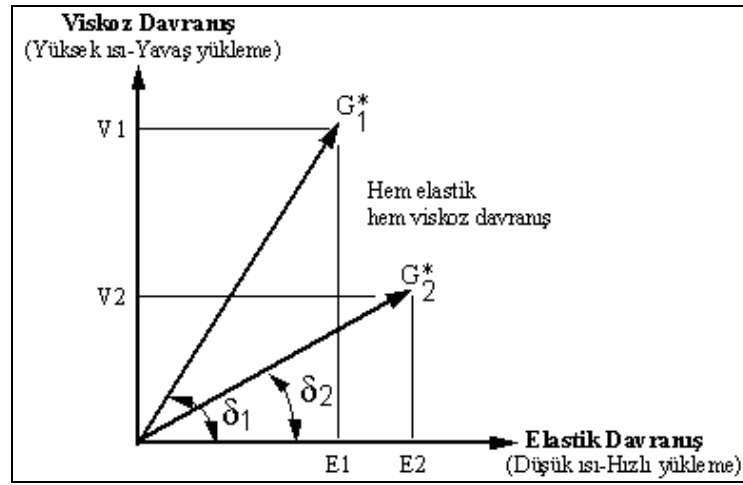
Şekil 6.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Çalışma Şekli.

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/saat trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır [Kennedy vd., 1994]. 10 rad/sn'lik sabit frekans (6.2) bağıntısı kullanıldığında yaklaşık 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekansa (f) ve (6.3) bağıntısı kullanıldığında 0,1 sn yükleme süresine (t) eşit olmaktadır. Yükleme süresi, kaplama üzerinden 50 mph. hızla hareket eden bir kamyon tekerleğinin geçmesinden kaynaklanan yükleme zamanını ifade etmektedir [Zaniewski ve Pumphrey,2004].

$$\omega = 2\pi f \quad (6.2)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (6.3)$$

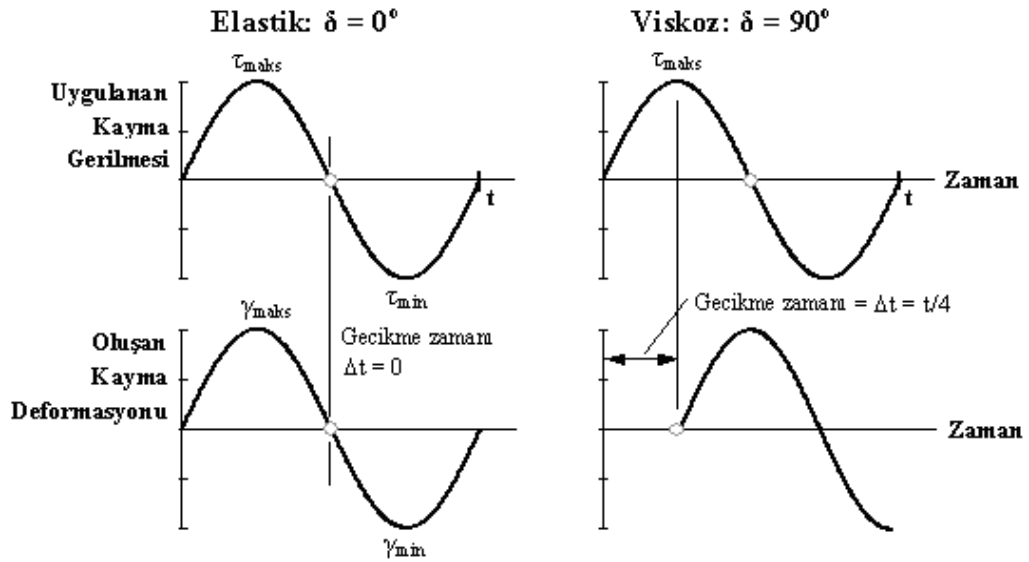
Kayma modülü (G^*), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür ve elastik ve viskoz olmak üzere Şekil 6.4’ te görüldüğü gibi iki bileşeni bulunmaktadır.



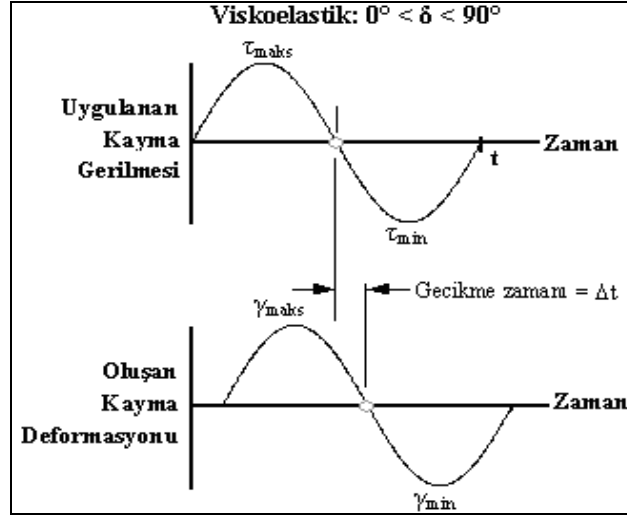
Şekil 6.4. Viskoelastik Davranış [Asfalt El Kitabı, 2002; Tunç,2001; Altaş, 2002].

Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Kesme modülü ve faz açısı yükleme frekansı ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Asfalt bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranır ve bu durum Şekil 6.5’ te düşey eksenle temsil edilmektedir. Yani faz açısı $\delta = 90^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülü (G^*) elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda ise asfalt bağlayıcı, oluşan deformasyonların tamamen geri döndüğü elastik katılar gibi davranmaktadır. Bu durumu ise aynı grafikteki yatay eksen temsil eder ve bu da faz açısı $\delta = 0^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülünün (G^*) viskoz bir özellik taşımadığı anlamına gelir [Tunç,2001; Altaş, 2002; Zaniwski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994].

Faz açısı (δ) uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Asfalt çimentosunun viskoelastik yapısından dolayı numuneye uygulanan gerilmeler ilk etapta numune tarafından karşılanmakta ancak belirli bir süre sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının 0° olması numunenin tam elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise tam viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir (Şekil 6.5). Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişecektir (Şekil 6.6). Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir [Kennedy vd., 1994; McGennis vd.,1994].



Şekil 6.5. Viskoz ve Elastik Malzemelerde Gerilme- Deformasyon İlişkisi [Kennedy vd., 1994; McGennis vd.,1994].



Şekil 6.6. Viskoelastik Malzemelerde Gerilme-Deformasyon İlişkisi [Kennedy vd., 1994; McGennis vd.,1994].

Deneylerde, plakalar arasındaki aralık yüksekliğine göre iki farklı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve aralık yükseklikleri deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilir. Buna göre orijinal veya işlem görmemiş ve RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılarda 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2000 mikron (2 mm) aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Asfalt numune yerleştirilmeden önce plakalar arasındaki aralık gerekli değerden 50 mikron (0,05 mm) büyük olacak şekilde ayarlanır

DSR deneyinde deney sıcaklık aralığı, asfalt bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46 ile 82 °C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4 ile 40 °C arasında değişmektedir. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak kayma gerilmesi veya kayma deformasyonu değeri hedef verisi olarak bilgisayara girilmelidir Bağlayıcının yaşlanma durumuna göre bilgisayara girilen bu değerler Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5. Hedeflenen Kayma Gerilmesi ve Deformasyon Değerleri [National Asphalt Training Center ,1994; McGennis vd.,1994; Petersen vd.,1994].

Bağlayıcı Çeşidi	Hedef Kayma Deformasyonu, %	Hedef Kayma Gerilmesi, kPa
İşlem görmemiş	12	0,12
RTFOT'ta yaşlandırılmış	10	0,22
PAV'da yaşlandırılmış	1	50

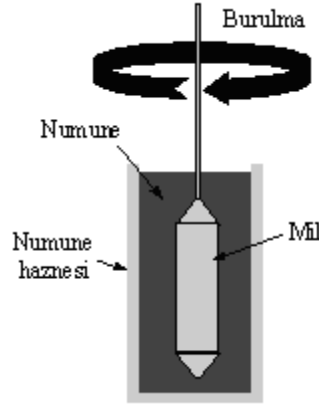
6.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402-87)

Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılmakta ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir [Altaş, 2002; Zaniwski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994]. Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta asfalt bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir (Şekil 6.7). Bu burulma kuvveti, viskozimetre tarafından belirlenen bağlayıcı viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir [McGennis vd.,1994]. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm.) hızla döndürülürken, viskozluk değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır

Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları sırasıyla 170

± 20 ve 280 ± 30 cP viskozite değerindeki sıcaklıklar olarak belirlenmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir [Zaniewski ve Pumphrey,2004; Petersen vd.,1994].



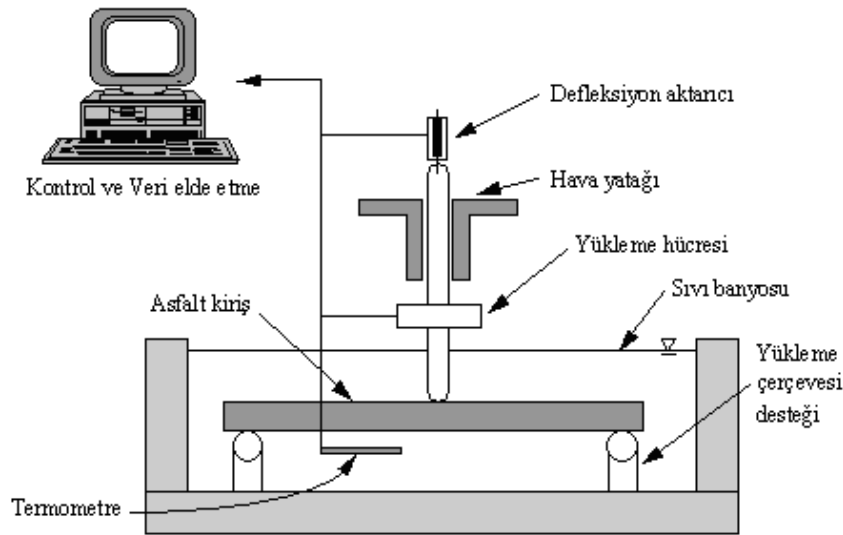
Şekil 6.7. Brookfield DV-III Ultra Dönel Viskozimetresi.

6.1.4. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1)

Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak da isimlendirilen düşük

sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda rijit davranış gösterdiğinden kaplamanın da rijit davranmasına sebep olurlar ve bu davranış, kaplamanın termal çatlak riskini arttırmaktadır. Bu sebeple SHRP tarafından, asfaltın düşük sıcaklıklardaki davranışının gözlenmesi amacıyla kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçmekten ibarettir ve bu nedenle asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklarda sahip olabileceği elastik davranışını belirlemeye çalışır [Zaniewski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994; Loh ve Olek, 1999]. Ayrıca RTFOT ve PAV testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de deney yapılabildiğinden, asfalt bağlayıcının zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir. BBR deneyi sonucunda asfalt bağlayıcının sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerleri elde edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmektedir [Tunç,2001; Zaniewski ve Pumphrey,2004; National Asphalt Training Center ,1994; McGennis vd.,1994; Loh ve Olek, 1999].

BBR deney aletinin şematik görünüşü Şekil 6.8’ de verilmiştir. Deney aleti Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Kiriş Eğme Reometresinin (BBR) Şematik Görünüşü [Kennedy vd., 1994; Reubush,1999; McGennis vd.,1994; Loh ve Olek, 1999].

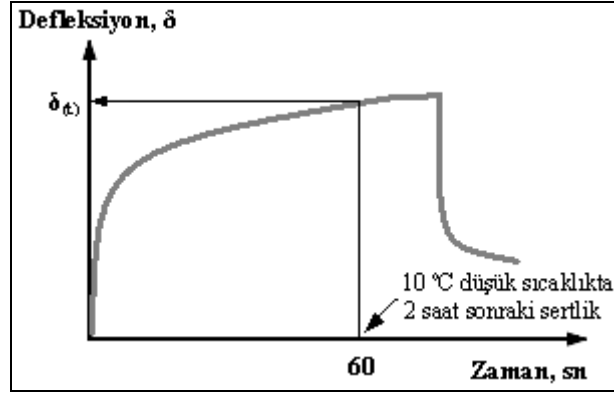
BBR deneyinde, asfalt numunenin yük altındaki sertliğinin tespit edilmesinde kiriş teorisi kullanılmaktadır. Standart ölçülerdeki kiriş şeklindeki asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet 100 ± 5 gr (980 ± 5 mN) uygulanır ve 240 saniyelik deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon farklı sürelerde (8, 15, 30, 60, 120, 240 sn) sistem tarafından ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Deney sırasındaki yükleme, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir. Sünme sertliği (S), asfaltın sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç ve sünme oranı (m-değer) ise yükleme süresince asfaltın sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir.

Asfalt bağlayıcının sünme sertliğinin belirlenmesi amacıyla, standart ölçüleri 12,5x125x6,25 mm olan asfalt kiriş esas alınarak, klasik kiriş analiz teorisi kullanılmaktadır [Zaniewski ve Pumphrey,2004; Petersen vd.,1994].



Şekil 6.9. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti.

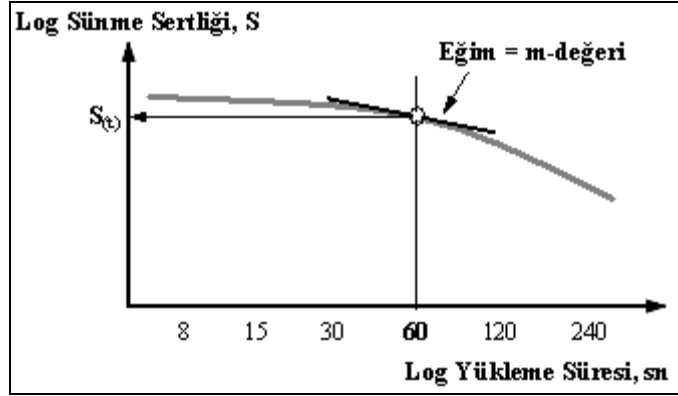
Bu deneyde, geliştirilmiş cihazın bilgisayar programı, Şekil 6.10'da görüldüğü gibi defleksiyon-zaman grafiğini vermektedir.



Şekil 6.10. Defleksiyonun (δ) Grafikte Belirlenmesi [Tunç,2001; McGennis vd.,1994].

Minimum kaplama dizayn sıcaklığındaki sünme sertliği değerine iki saatlik yükleme sonucu ulaşılmaktadır. Fakat SHRP araştırmacıları, deney sıcaklığının 10°C arttırılması sonucu aynı sünme değerinin 60 saniye sonra elde edildiğini belirlemişlerdir. Bu sayede deney sonucu daha erken bir sürede alınabilmektedir. Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertliği değerinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir [Kennedy vd., 1994; Zaniwski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994; Petersen vd.,1994]. Ancak bu değer 300–600 MPa arasında ise doğrudan çekme deneyi kopma deformasyon değeri şartnamede öngörülen şartı sağlamalıdır [Tunç,2001].

Deney sonucunda elde edilen ikinci parametre olan sünme oranı (m-değer), zamana bağlı olarak $S_{(t)}$ değerinin değişimini ifade etmektedir. Bu değer bilgisayar yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanır. Bu değeri elde etmek için, farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde belirli bir andaki teğetin eğimi sünme oranı (m-değer) olarak alınmaktadır (Şekil 6.11). Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme oranı değerinin en az 0,300 olması istenmektedir [Kennedy vd., 1994; Zaniwski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994; Petersen vd.,1994].



Şekil 6.11. Sünme Oranı (m-değer) Değerinin Grafikte Belirlenmesi [Tunç,2001; Kennedy vd., 1994; Zaniwski ve Pumphrey,2004; McGennis vd.,1994].

6.1.5. Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)

Penetrasyon, bitümün sertlik ve kıvamının bir ölçüsüdür. Penetrasyon deneyi standart bir iğnenin belirli ısı, yük ve zaman koşulları altında, numuneye düşey olarak battığı derinliğin ölçülmesinden ibarettir. Bitümlü malzeme, 25 °C’de 100 g yükle ve 5 saniye süreyle penetrasyona uğrattılır [Pereira vd.,2006]. Bu koşullar altında yapılan deneyin sonucuna normal penetrasyon denilmektedir. Penetrasyon birimi santimetrenin yüzde biridir ve aletin göstergesindeki her bir birim 0,1 mm yi göstermektedir. Penetrasyon deneyi sonunda okunan değer 100 ise, deneye tabi tutulmuş olan bitümlü bağlayıcının penetrasyonu 100 demektir. Yani iğne bu bitümlü bağlayıcının içerisine 1 cm girmiştir [Keçeciler vd.,1990]. Penetrasyon deney aleti Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Penetrasyonun değeri kıvamlilikla ters orantılı olup, penetrasyon değeri yükseldikçe deneye tabi tutulan bitümlü bağlayıcı daha yumuşak bir kıvama sahip olur.



Şekil 6.12. Penetrasyon Deney Cihazı.

6.1.6. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120 EN 1427)

Bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıklarını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmek için uygulanan deneydir. Yumuşama noktası genel olarak, bir su banyosu içine yerleştirilmiş ve üzerinde bir bilye bulunan standart bir kalıp içerisindeki bitümlü malzemenin, belirli bir hızla ısıtılması sonucunda yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır [TS 120 EN 1427, 2002]. Bitümlü karışımların sıcak havalarda deformasyona uğraması bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasına bağlıdır. 25 °C deki penetrasyonları aynı olan iki bağlayıcıdan yumuşama noktası yüksek olan sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Dolayısıyla kaplamada kullanılan bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası düşükse viskoz davranış ve kalıcı deformasyon erken baslar. Bitümlü kaplamanın kalıcı deformasyonlarında etkili faktörlerden biri yumuşama noktasıdır. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir [Kutluhan ve Ağar,2004]. Şekil 6.13' te Yumuşama Noktası deney cihazı gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Yumuşama Noktası Deney Cihazı.

6.2. Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerine Uygulanan Deneyler

6.2.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Tez çalışmasında BSK numunelere uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre yapılmıştır. Standartta stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen deformasyon olarak tanımlanmaktadır [TS EN 12697-34+A1, 2007]. Standartta göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmekte, daha sonra numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40 ile 60 dakika arasında bekletilmektedir. Kırma çenesi ise $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalananak biçimde yerleştirilir. İçinde numune bulunan kırma çenesi Marshall stabilite aletine yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 6.14' te görülmektedir.



Şekil 6.14. Marshall Stabilite ve Akma Aleti.

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yük sırasındaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$C = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (6.4)$$

6.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirekt çekme ve burulma deneyleri uygulanabilmektedir. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Diametral (çap doğrultusunda yük uygulanan) deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır [Kök, 2007]. Bitümlü tabakaların yük

dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir [Zoorob ve Suparma, 2000]. BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. ITSM Deney Düzeneği.

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (6.5)$$

Burada S_m , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm), L ortalama numune yüksekliği (mm), R ise poisson oranıdır (0,35).

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalama alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir.

6.2.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [Francken, 1998]. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır [Kök, 2007]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Laboratuvar ortamında bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Bu deneyler, gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Deney türüne göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışı farklılık gösterdiğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri farklılık gösterebilmektedir. Yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında belirlenen yorulma ömrünün arazide tespit edilen yorulma ömründen çok daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır [Ghile, 2006]. Buna rağmen

yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırmak için imkan sağlamaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyinde (İÇYD), numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekerrür sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekerrür sayıları belirlenmektedir (N_f). Böylece N_f ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler formülünden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (6.6)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekerrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir [Molenaar ve Medani, 2000]. Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üssel katsayı olan k_2 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın k_1 değerlerinin aynı olması durumunda k_2 katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır. Diğer taraftan k_2 değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermekte olup daha düşük k_1 değerine sahip karışımın yorulma ömrü daha düşük olacaktır [Simms,1998].

İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 48’de deney düzeneği görülmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak sensörler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 6.16. Yorulma Deney Düzeneği

6.2.4. Tokluk İndeksi Deneyi

Tokluk indeksi, indirekt çekme gerilmesi deneyinden hesaplanan gerilme şekil değiştirme ilişkisinde eğrinin maksimum noktasından sonraki bölgedeki tokluk karakteristiğini tanımlayan bir parametredir. Deneyde silindirik numunelere çap doğrultusunda 25 C°’de 50 mm/dakika hızda statik yük uygulanmaktadır. Bozulmaya neden olan maksimum yüke bağlı olarak indirekt çekme mukavemeti (ITS) aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

$$ITS = 2P / \pi t D \quad (6.7)$$

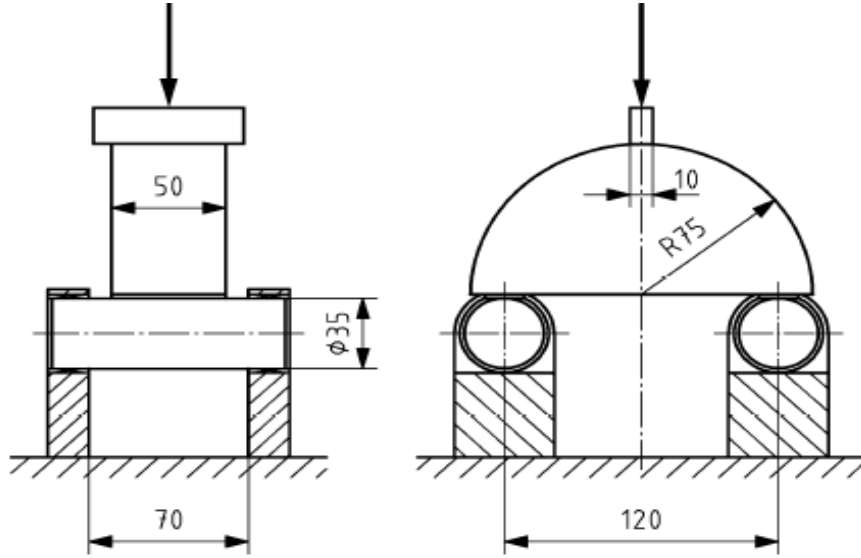
Burada P: uygulanan maksimum düşey yük (kN), t: numunenin ortalama kalınlığı (m), D: numunenin çapıdır (m). Boyutsuz tokluk indeksi değeri ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$TI = (A_e - A_p) / (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (6.8)$$

Burada ε : ilgilenilen seviyedeki şekil değiştirme, ε_p : maksimum gerilmedeki şekil değiştirme, A_e : ε şekil değiştirmeye kadar gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan, A_p : ε_p şekil değiştirmeye kadar gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alandır. Tokluk indeksi numunenin elastik performansını, tokluk indeksi 1 olan tam elastik referans numunesine göre karşılaştırmaktadır. Maksimum gerilmeden sonra bir yük taşıma kapasitesi olmayan ideal bir gevrek malzemede tokluk indeksi sıfır olmaktadır [Kabir 2008]. Bu çalışmada tokluk indeksi değerleri %1, %2 ve %3 şekil değiştirme seviyeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

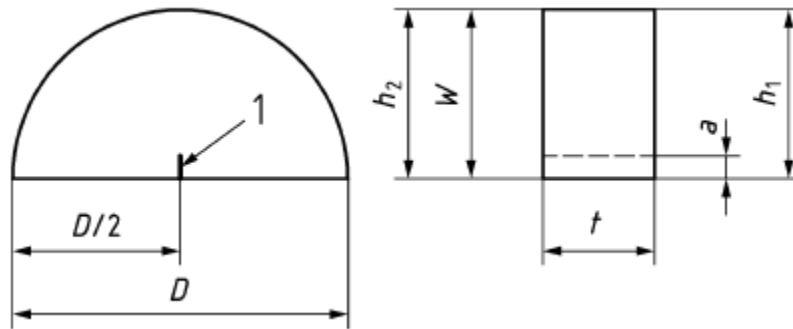
6.2.5. Yarım Daire Eğilme Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'ne göre değerlendirilmesiyle ilgili farklı bitümler içeren araziden alınan ve laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde yarım daire eğilme deneyleri uygulanmış ve bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak EN 12697-44 standardı hazırlanmıştır [Bakker,2001]. Ağustos 2010'da standartlaşan deneyde yarım silindir şeklindeki deney numunesinin alt yüzeyinin ortasına çentik açılmakta ve üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmaktadır. Deney süresince deformasyon 5 mm/dak sabit hızla artmaktadır. Standarda göre maksimum yük, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı dayanımıyla doğrudan ilişkilidir.



Şekil 6.17. Yarım daire eğilme deney düzeneği [EN 12697-44, 2010].

Deney araziden alınan veya laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Numuneler 150 ± 1 mm çapında ve 50 ± 3 mm kalınlığında kesilmektedir. Kesme işlemi sırasında yüzeylerin düzgün ve birbirine paralel olmasına dikkat edilmelidir. Ardından numuneler ortadan ikiye bölünerek yarım daire şeklinde iki numune elde edilmektedir. Yarım daire numunelerin düz kısmının ortasına genellikle $0,35 \pm 0,1$ mm genişliğinde ve 10 ± 1 mm yüksekliğinde çentik açılmaktadır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Numuneye Çentik Açılması.

Deney sırasında numune kuru olmalıdır. Şekil 6.18' de görülen h_1 ve h_2 numune yükseklikleri arasındaki farkın $0,5$ mm.' den fazla olmamalı, farkın $0,5$ mm.' den olduğu

durumlarda numuneler kullanılmamalıdır. Aynı şekilde düzgün yüzeyin iki uç noktasından ölçülen taban kalınlıkları arasındaki farkın 0,5 mm.'den fazla olması durumunda numune kullanılmamalıdır. Deney sonucunda maksimum yük (F_{mak}) ve maksimum düşey deformasyon (ΔW) değerleri elde edilmektedir. Maksimum yük anındaki şekil değiştirme aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$\varepsilon_{mak} = \frac{\Delta W}{W} * 100 \quad (6.9)$$

Burada W , numunenin yüksekliğini (mm) ΔW , maksimum yük sırasındaki deformasyonu (mm) ε_{mak} , maksimum birim şekil değiştirmeyi (%) ifade etmektedir. Kırılmaya neden olan maksimum gerilme (σ_{mak}) aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (6.10)$$

Burada D , numunenin çapını (mm), t , numunenin kalınlığını (mm), F_{mak} , maksimum yükü (N), σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm^2) ifade etmektedir. Kırılma tokluğu (K_{IC}) ise aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_{mak} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6.11)$$

Burada W , numune yüksekliğini (mm) a , çentik yüksekliğini (mm) σ_{mak} , maksimum gerilmeyi (N/mm^2), K_{IC} kırılma tokluğunu ($N/mm^{3/2}$), $f\left(\frac{a}{W}\right)$, numunenin geometrik faktörünü ifade etmektedir. Geometrik faktör birimsiz olup virgülden sonra üç hane olacak şekilde yuvarlanmaktadır. Çatlak yüksekliği $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$ ve numune yüksekliği $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$ ise $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$ olarak alınmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlar düşük sıcaklıklarda elastik davranış göstermesine rağmen yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış, normal şartlarda ise viskoelastik davranış sergilediklerinden bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen çatlak ve kırılmaları normal ve yüksek sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği ile değerlendirmek uygun değildir.[Özdemir, 2006; Yılmaz, 2011].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada atık lastiklerin öğütülerek ufaltılması ile elde edilen atık malzemenin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı düşük sıcaklık performansı açısından değerlendirilmiştir. Değerlendirmede öğütülmüş atık lastik modifiyeli bitüm ve karışımlar, katkı içermeyen kontrol numunelerinin yanı sıra kullanımı oldukça yaygınlaşan SBS modifiyeli bitüm ve karışımlar ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla ilk önce çalışmada kullanılacak malzemelerin karakteristikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Çalışma temel olarak iki bölümden oluşmaktadır birinci bölümde değişik oranlarda atık lastik ve SBS içeren bitümler üzerinde dinamik kesme reometresi ve kırılganlık eğilme deneyleri uygulanmıştır. İkinci bölümde ise atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışım numuneleri ve modifiyesiz bağlayıcı ile hazırlanmış kontrol numuneleri üzerinde indirek çekme rijitlik modülü, indirek çekme tekrarlı yorulma, tokluk indeksi ve yarım daire eğilme deneyleri uygulanmıştır.

7.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bağlayıcıya ait özellikler Tablo 7.1’ de verilmiştir.

Tablo 7.1. Bağlayıcının Özellikleri.

Özellikler	Standart	B 160/220
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	192
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	44,5
Penetrasyon indeksi (PI)		1,582
Özül ağırlık		1,013
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	250
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	100
Karıştırma sıcaklığı (°C)		145
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)		130

Bitüm modifikasyonunda kullanılan öğütülmüş atık lastik Samsun Akın Plastik firmasından temin edilmiştir. Öğütülmüş atık lastik elementel analizi Tablo 7.2’ de verilmiştir. Atık lastik mekanik parçalama yöntemi ile elde edilmiştir. Parçalama işlemi öncesinde topuk teli denen kalın tel, çekme yöntemi ile lastikten ayrılmakta daha sonra döner bıçaklı sistemle çalışan 4 makineden küçültmek suretiyle parçalama işlemi gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada lastik 4’e bölünüp, Snider denilen makine ile el büyüklüğünde parçalara ayrılmaktadır. Daha sonraki aşamalarda sırasıyla 20, 12 ve 6mm’lik eleklerden geçecek şekilde parçalara ayrılmaktadır. Parçalama işlemi gerçekleştirildikten sonra mıknatıs yardımı ile diğer tel parçacıkları, öğütülmüş lastik parçacıkları içinden ayıklanmaktadır. Daha sonra yine değirmenler vasıtasıyla 0,3 – 0,6 mm çapındaki parçacıklara dönüştürülmektedir.

Çalışmada öğütülmüş atık lastikler B 160-220 bitümüne ağırlıkça %2-%10 aralığında %2 artımla ilave edilmiştir.

Tablo 7.2. Atık lastik Elementel Analizi.

Kauçuk	Kurum	Tekstil elyafı	Yağ, reçine	Kimyasal	Kükürt
% 35	% 24	% 24	% 10	% 5	% 2

Bitüm modifikasyonunda kullanılan bir diğer katkı maddesi olan SBS (KRATON D1101) Shell Bitumen şirketinden temin edilmiştir. Çalışmada SBS, B 160-220 bitümüne ağırlıkça %2-%6 aralığında %1 artımla ilave edilmiştir.

Çalışmada agregaya olarak Elazığ Karayazı bölgesinden temin edilen kırmataş kalker kullanılmıştır. Agregaya ait fiziksel özellikler ve karışımlarda kullanılan agregaya gradasyonu sırasıyla Tablo 7.3 ve Tablo 7.4’ te verilmiştir.

Tablo 7.3. Agreganın Fiziksel Özellikleri.

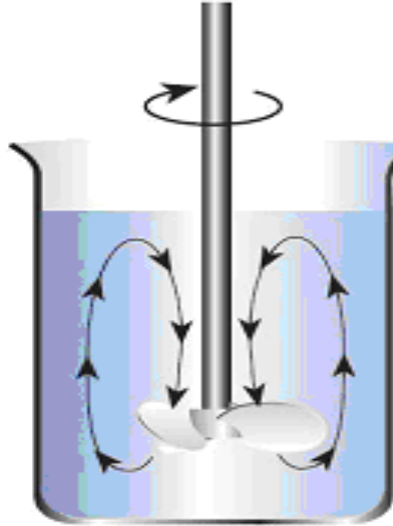
Özellikler	Standart	Limitler	Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C 131	Max 30	29	-	-
Don etkisi (%) (with Na ₂ SO ₄)	ASTM C 88	Max 10	4.5	-	-
Yassı ve uzun daneler (%)	ASTM D 4791	Max 10	4		
Su emme (%)	ASTM C127	Max 2	1.37		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C127		2.613	-	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128		-	2.622	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM D854		-	-	2.711

Tablo 7.4. Agregaya Gradasyonu.

Elek çapı (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Geçen (%)	100	95	88	65	35	23	15	11	8	6

7.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Modifiye bağlayıcının laboratuvarında üretimi için firmalar tarafından geliştirilen değişik karıştırma milleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kap içinde Şekil 7.1’ deki etkiyi yapan Şekil 7.2’deki karıştırma mili kullanılmıştır. Öğütülmüş atık lastik ve SBS katkılı modifiye bitümler, saf bitüm akışkan hale gelip karıştırma kabına aktarıldıktan sonra katkının belirlenen içerikte yavaş yavaş ilave edilip, 1000 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda (Şekil 7.3) 180 °C sabit sıcaklıkta 1 saat süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler küçük kaplara boşaltılmış, kaplar alüminyum folyo ile kaplanmış ve deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır.



Şekil 7.1. Karıştırma Milleri ve Etkileri.



Şekil 7.2. Çalışmada Kullanılan Karıştırma Mili.

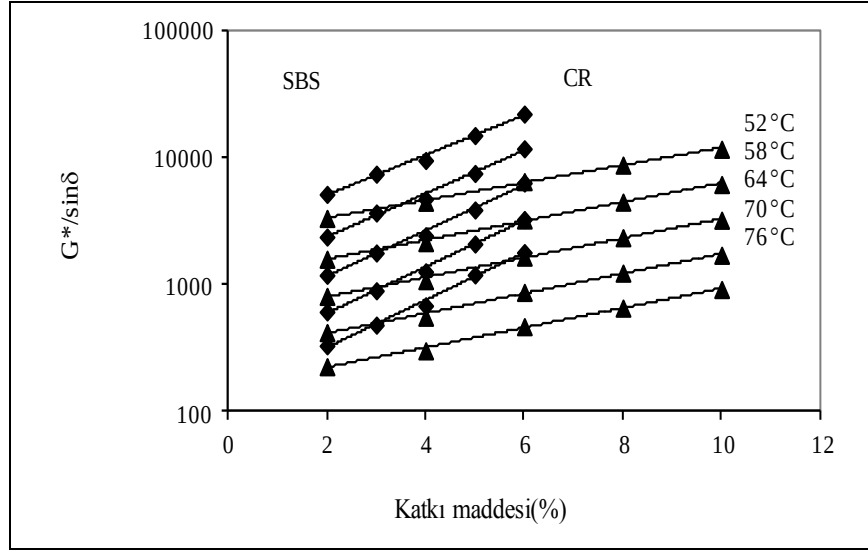


Şekil 7.3. Modifiye Bitüm Karıştırma Cihazı.

7.3. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

7.3.1. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

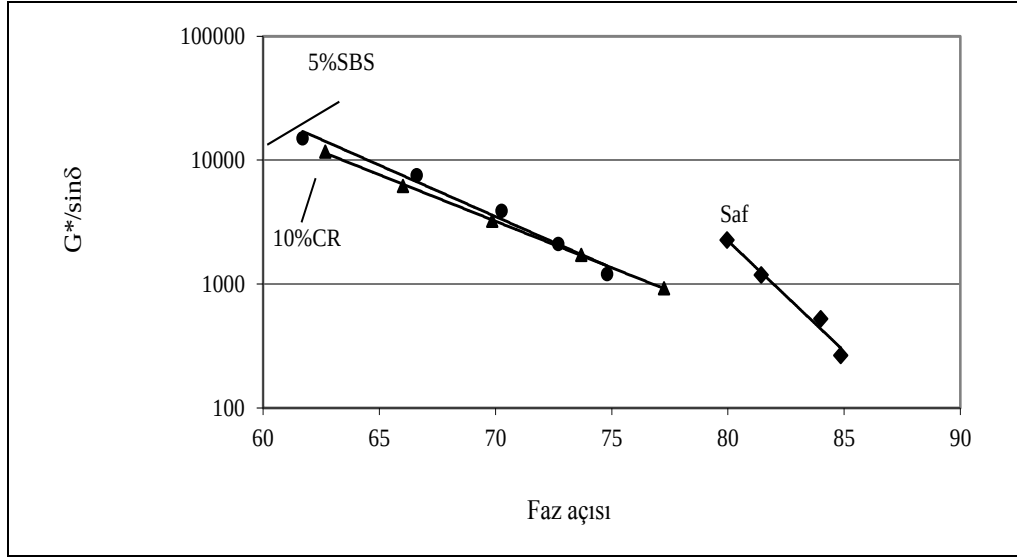
Çalışmada saf ve katkılı bitüm numunelere 1,59 devir/saniye (Hz) hızda ve 52 °C, 58 °C, 64 °C, 70 °C ve 76 °C sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanarak bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları belirlenmiş ayrıca faz açıları karşılaştırılarak elastik özellikleri değerlendirilmiştir. Şekil 7.4’te farklı katkı içeriklerindeki bağlayıcıların tekerlek izi parametresinin farklı sıcaklıklardaki değişimi verilmiştir.



Şekil 7.4. Tekerlek İzi Parametresinin Sıcaklıkla Değişimi.

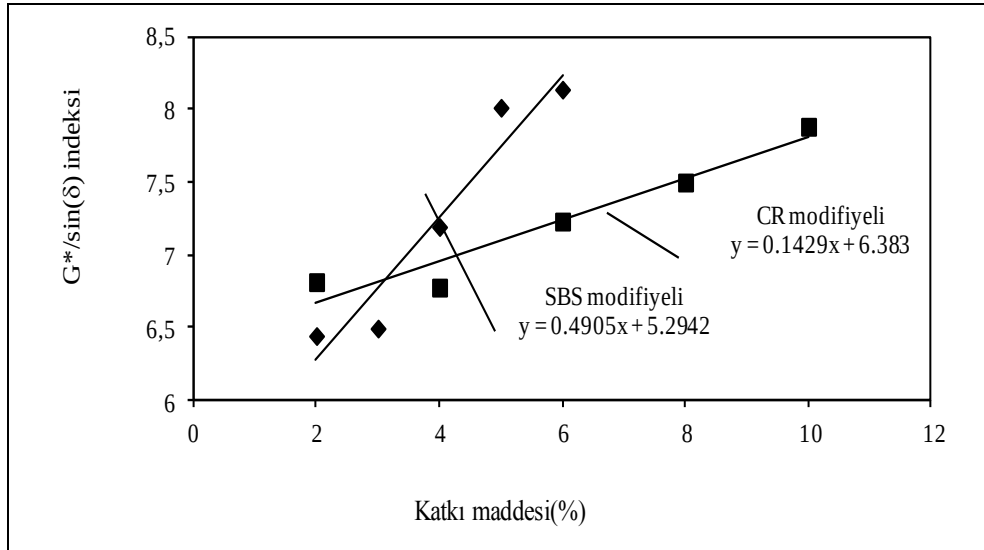
Şekilden görüldüğü üzere katkı oranını artması ile birlikte $G^*/\sin\delta$ değerleri artmakta, bu artış eğilimi bütün sıcaklıklarda benzer olmaktadır. SBS modifikasyonunda katkı oranının artması ile beraber $G^*/\sin\delta$ 'da meydana gelen artış trendi CR modifikasyonundan fazladır. Bu sonucun nedeni, kompleks modülünün büyük olması buna karşılık faz açısının küçük olması yada her ikisinin birden söz konusu olması olabilir. Aynı tekerlek izi parametresine sahip olabilmesi için CR oranının SBS oranından çok fazla kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

%5 SBS ve %10 CR modifiyeli bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerine karşılık faz açıları meydana gelen değişim Şekil 7.5'te verilmiştir. Şekil aynı tekerlek izi parametresine sahip SBS ve CR modifiyeli bağlayıcıların faz açılarını dolayısı ile elastik davranışlarını karşılaştırma imkanı vermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıdan oldukça fazla elastik özellik sergilemektedirler. Katkılı bağlayıcıların faz açıları arasındaki fark düşük $G^*/\sin\delta$ değerlerinde çok fazla değilken bu fark yüksek $G^*/\sin\delta$ değerlerinde açılmakta ve CR modifiyeli bağlayıcılar daha az faz açısına sahip olarak daha fazla elastik davranış sergilemektedir.



Şekil 7.5 $G^*/\sin\delta$ - Faz açısı Değişimi.

Şekil 7.6'da 52 °C'deki $G^*/\sin\delta$ değerlerinin 76 °C'deki değerlere oranlanması ile elde edilen $G^*/\sin\delta$ indislerinin katkı oranı ile değişimi verilmiştir. SBS modifiyeli bağlayıcıların indislerinde meydana gelen artış eğiliminin CR numunelerinininkinden fazla olduğu özellikle katkı oranının artması ile bu farkın açıldığı görülmektedir. SBS oranında katkı oranının artması ile meydana gelen performans artışı CR numunelerine göre çok fazla olmaktadır.



Şekil 7.6 $G^*/\sin\delta$ İndislerinin Katkı Oranı ile Değişimi.

Dinamik kesme reometresi deneyi sadece orijinal bağlayıcılara değil, bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesini belirlemek amacıyla kısa ve uzun süreli yaşlandırılmış numuneler üzerine de uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar toplu olarak Tablo 7.5’te verilmiştir. Saf ve %2 CR modifiyeli bağlayıcılar PG 58; %2 ve %3 SBS, %4 ve %6 CR modifiyeli bağlayıcılar PG 64; %4 SBS, %8 ve %10 CR modifiyeli bağlayıcılar PG 70; %5 ve %6 SBS modifiyeli bağlayıcılar PG 76 yüksek sıcaklık performans sınıfına girmişlerdir.

Tablo 7.5 DSR Test Sonuçları .

Sıcaklık(°C)	G*/sinδ (Pa)										
	Saf	2%SBS	3%SBS	4%SBS	5%SBS	6%SBS	2%CR	4%CR	6%CR	8%CR	10%CR
52	2263	5168	7452	9551	15001	22133	3346	4486	6514	8788	11710
58	1182	2387	3690	4735	7551	11803	1597	2158	3254	4495	6182
64	523	1194	1788	2444	3896	6352	815	1084	1660	2359	3239
70	265	615	902	1271	2104	3276	423	559	876	1242	1717
76		333	484	687	1202	1801	228	304	471	659	923
	δ(°)										
52	79.96	72.66	66.33	65.40	61.70	60.10	76.40	72.71	69.16	65.18	62.68
58	81.43	76.26	71.48	69.98	66.61	61.50	79.34	76.30	72.66	68.61	66.02
64	83.99	78.88	76.15	73.39	70.26	66.30	81.79	78.97	75.81	72.89	69.86
70	84.85	80.68	79.84	75.70	72.70	70.21	83.83	81.43	78.84	76.36	73.69
76		81.75	82.49	78.04	74.80	73.02	84.02	83.26	81.53	79.74	77.25
	G*.sinδ (Pa.10 ⁶) PAV kalıntısı										
16	2.2050						1.7760				
19	1.6270	1.3463	1.2240				1.2874	1.2753	1.5260		
22		0.6998	1.1521	0.4947				0.9439	1.0964	0.8792	0.9635
25				0.3590	0.5840					0.6504	0.7265
28					0.3500	0.6310					
31						0.5010					
	G*/sinδ (Pa) RTFOT kalıntısı										
58	7277						9552				
64		10960	11938					6849	10560		
70				7602						7701	9294
76					6340	8311					

7.3.2. Eğilme Kiriş Deney Sonuçları

Farklı sıcaklıklarda saf ve katkılı bağlayıcılar için elde edilen sünme rijitlikleri ve sünme oranı değerleri Tablo 7.6' da verilmiştir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte sünme oranı değerleri düşmekte, sünme rijitliği değerleri artmaktadır. Her iki modifiye bağlayıcının sünme oranı değerlerinde ve SBS modifiyeli bağlayıcıların sünme rijitliği değerlerinde katkı oranı değişimi ile meydana gelen değişim düzenli olmamakla birlikte CR modifiyeli bağlayıcıların sünme rijitliğindeki değişim % CR oranı hariç düzenlidir. CR modifiyeli bağlayıcıların sünme rijitlikleri katkı oranının artması ile düzenli olarak azalırken, sıcaklığın düşmesi ile artmaktadır. Bu sonuç CR modifikasyonunda SBS modifikasyonuna göre özellikle yüksek katkı oranlarında daha homojen bir karışım elde edildiğine işaret etmektedir.

CR modifikasyonunda -18°C 'de en düşük sünme rijitliği değeri %10 CR içeriği ile elde edilmiş olup bu değer saf bağlayıcının sünme rijitliğinden %30 daha düşüktür. SBS modifikasyonunda ise -18°C 'de en düşük sünme rijitliği %6 SBS içeriği ile elde edilmiş olup bu değer saf bağlayıcının sünme rijitliğinden %6 daha büyüktür.

Tablo 7.6 BBR Test Sonuçları.

Sıcaklık (°C)	m-değeri										
	B 160/220	2%SBS	3%SBS	4%SBS	5%SBS	6%SBS	2%CR	4%CR	6%CR	8%CR	10%CR
-18	0.362	0.355	0.372	0.330	0.338	0.345	0.383	0.359	0.370	0.352	0.358
-24	0.338	0.328	0.313	0.313	0.303	0.274	0.325	0.324	0.316	0.310	0.307
-30	0.270	0.239	0.260	0.216	0.242	0.245	0.257	0.255	0.265	0.269	0.248
Sünme Sertliği (Mpa)											
-18	89.31	97.22	99.41	91.92	100.72	94.74	97.54	77.39	68.56	63.27	62.06
-24	112.45	144.25	149.85	138.97	142.67	158.84	123.94	151.59	140.23	134.90	112.91
-30	129.31	224.55	267.15	207.53	202.55	207.25	134.22	159.71	154.87	148.80	122.45
Defleksiyon (mm)											
-18	0.893	0.825	0.801	0.880	0.796	0.843	0.820	1.034	1.161	1.266	1.292
-24	0.709	0.541	0.533	0.583	0.570	0.514	0.643	0.527	0.594	0.591	0.710
-30	0.620	0.362	0.299	0.387	0.398	0.390	0.594	0.493	0.515	0.536	0.651
Performans Seviyesi (PG)											
	58-34	64-34	64-34	70-34	76-34	76-28	58-34	64-34	64-34	70-34	70-34

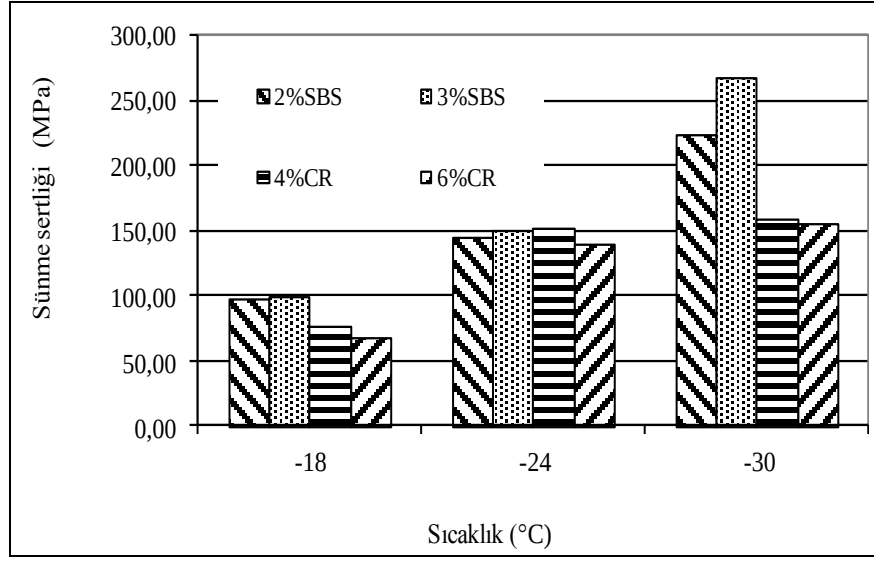
Tablo 7.6' da görüldüğü üzere hiçbir bağlayıcının sünme rijitliği değeri en düşük sıcaklıkta bile 300 MPa değerini geçmemekte dolayısı ile bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesinin tespitinde sünme oranı değerleri belirleyici olmuştur. %6 SBS hariç bütün bağlayıcılar -24°C 'de sünme rijitliği ve sünme oranı bakımından gerekli değerleri sağlayarak PG -34 düşük sıcaklık sınıfına %6 SBS ise PG -18 düşük sıcaklık sınıfına girmişlerdir.

Tablo 7.6' daki defleksiyon değerleri incelendiğinde CR modifikasyonunda katkı oranının artması ile defleksiyon değerleri bütün sıcaklıklarda düzenli olarak artmaktadır. %10 CR modifiyeli bağlayıcının defleksiyon değeri saf bağlayıcınınkinden bile düşük çıkmıştır. Bu da yük altında yüksek bir enerji dağıtma potansiyeline işaret etmektedir.

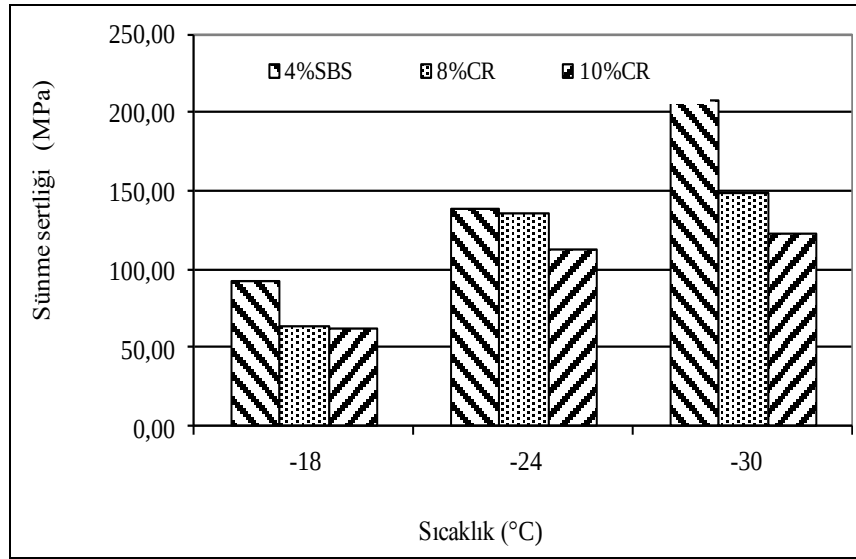
DSR sonuçları ile birlikte belirlenen, bağlayıcıların performans sınıfları Tablo 7.6'da verilmiştir. %2, %3 SBS ve %4, %6 CR modifiyeli bağlayıcılar PG 64-34 sınıfına girerek aynı performans derecesine; %4 SBS, %8 CR, %10 CR modifiyeli bağlayıcılar PG 70-34 sınıfına girerek aynı performans derecesine sahip olmuşlardır.

Aynı performans derecesine sahip bağlayıcıların sünme rijitliklerinde sıcaklıkla meydana gelen değişim Şekil 7.7 ve 7.8'de verilmiştir. Ele alınan bağlayıcılar aynı düşük sıcaklık performans seviyesine sahip olduklarından doğal olarak -24°C 'de sünme rijitliklerinde önemli bir değişim yoktur. CR modifiyeli bağlayıcıların sünme rijitliklerinin -18°C ve -30°C 'de SBS modifiyeli bağlayıcıların değerlerinden daha düşük olması daha esnek davranış göstereceğine işaret etmekte bu da CR modifiyeli karışımların düşük sıcaklıklarda SBS modifiyeli karışımlara göre daha uzun servis ömrü sunmasına olanak tanımaktadır.

Şekillerden görüldüğü üzere SBS modifiyeli bağlayıcılar her sıcaklıkta CR modifiyeli bağlayıcılardan daha yüksek rijitliğe sahiptir. Bu sebeple %3 SBS oranı yerine %6 CR oranı PG 64-34 performans seviyesi için; %4 SBS oranı yerine %10 CR oranı PG 70-34 performans seviyesi için kullanılması ekonomik anlamda önerilebilir.



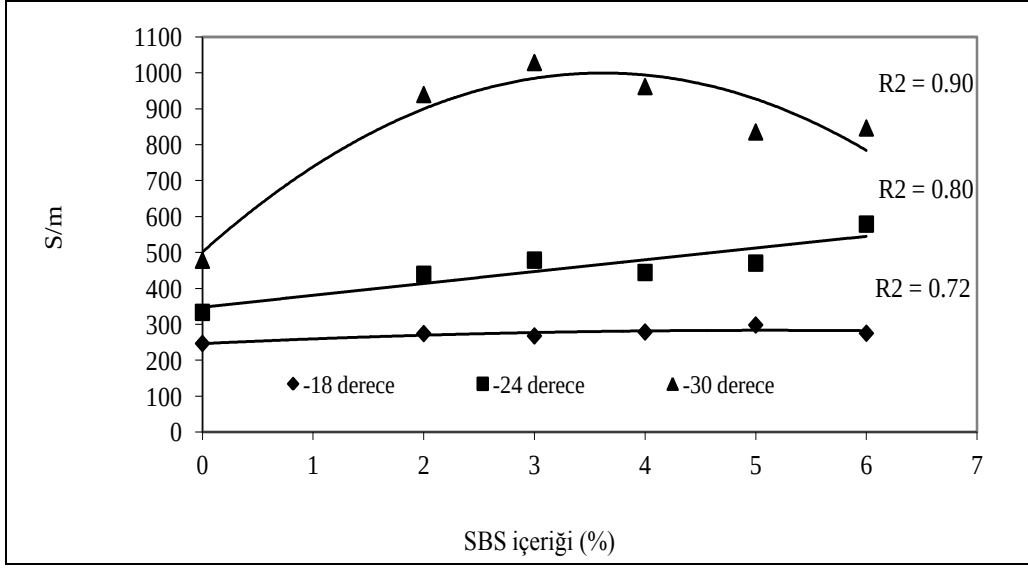
Şekil 7.7 Sünme Rijitliklerinin Sıcaklıkla Değişimi.



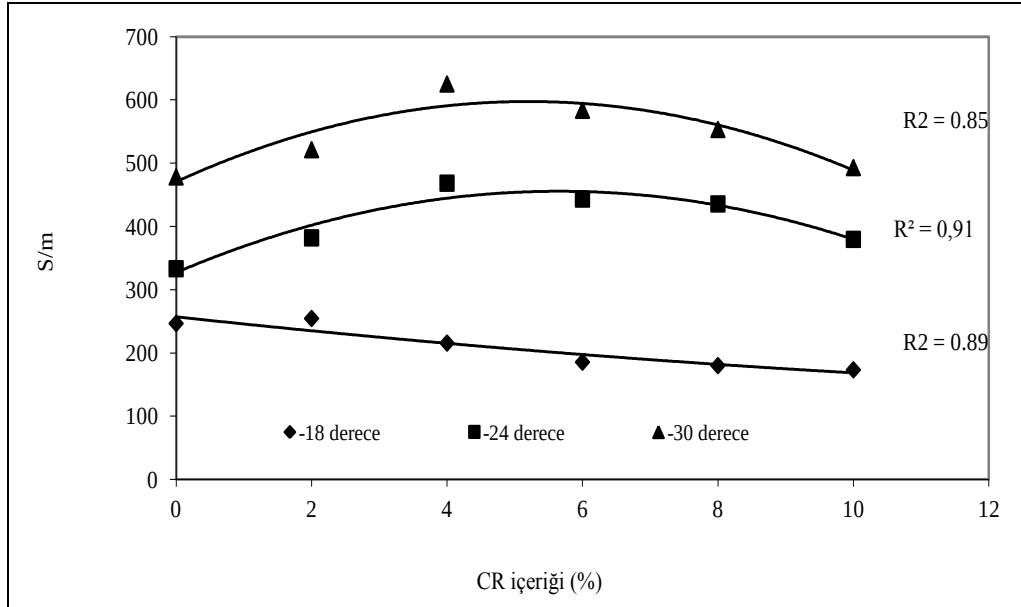
Şekil 7.8 Sünme Rijitliklerinin Sıcaklıkla Değişimi.

Sünme rijitliğindeki artış termal gerilmelerin artmasına neden olarak termal çatlak oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Sünme oranı değeri azalırken gerilmelerin akma ile sönümlenmesi de azalmaktadır. Bu sebeple düşük sünme rijitliği ve yüksek sünme oranı çatlama karşı iyi bir düşük sıcaklık özelliğine işaret etmektedir. Sünme rijitliğinin sünme oranına oranı olan λ çalışmada değerlendirilmiş ve Şekil 7.9’da SBS oranına, Şekil 7.10’da ise CR oranına karşılık λ ’daki değişim verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere sıcaklığın

λ üzerindeki etkisi SBS ve CR modifikasyonunda farklı olmaktadır. -18°C 'de λ 'daki değişim SBS oranında sabit kalırken CR modifikasyonunda katkı oranının artması ile azalmaktadır. -24°C 'de λ değerleri SBS modifikasyonunda katkı oranını artması ile birlikte sürekli bir artış gösterirken CR modifikasyonunda %4 CR oranına kadar artış daha sonra azalış olmuştur. -30°C 'de de her iki modifikasyon için λ değerleri artan katkı oranı ile birlikte ilk önce artış sonra azalış göstermiştir.



Şekil 7.9 Sünme Rijitliğinin Sünme Oranına Oranın (λ) Katkı İçeriği ile Değişimi.



Şekil 7.10 Sünme Rijitliğinin Sünme Oranına Oranın (λ) Katkı İçeriği İle Değişimi.

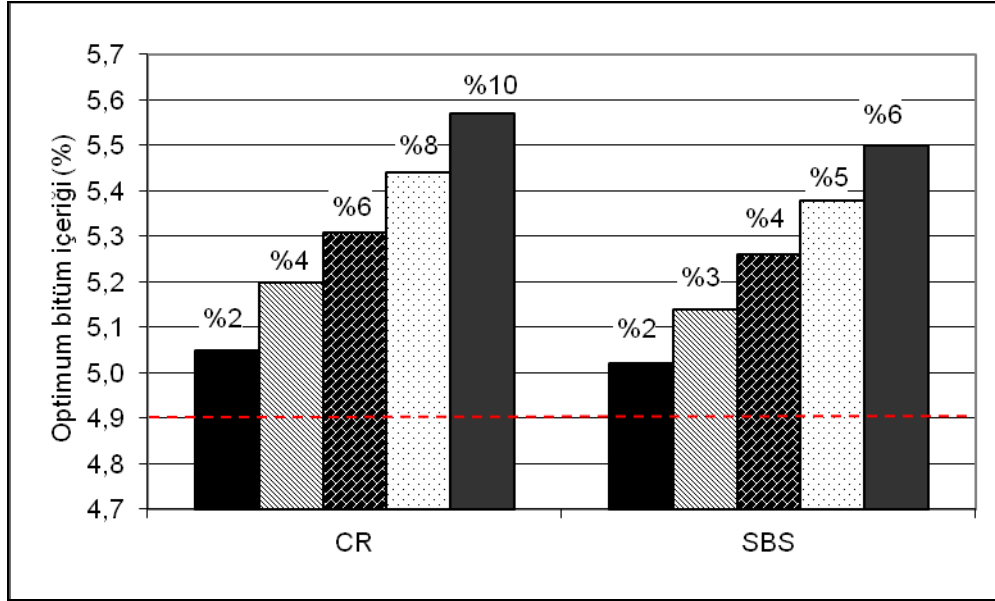
7.4. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

7.4.1 Optimum Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi

Çalışmada kullanılan bitümlü sıcak karışım numuneleri Marshall metoduna göre hazırlanmıştır. İlk etapta hiçbir katkı içermeyen kontrol numuneleri için gerekli optimum bağlayıcı oranı tespit edilmiştir. Bu amaçla farklı bitüm içeriklerinde üçer adet Marshall numuneleri, 101,6 mm çapındaki kalıplarda her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Öncelikle numunelerin üç ayrı yerden yükseklikleri ölçülmüş, havadaki kuru ağırlıkları (W_{kuru}), sudaki ağırlıkları (W_{suda}), havadaki doygun ağırlıkları (W_{doygun}) ve sıkıştırılmamış gevşek karışımın teorik özgül ağırlıkları (Gmm) ölçülerek, numunelerin pratik özgül ağırlıkları (Gmb), asfaltla dolu boşluk oranları (VFA), boşluk oranları (Va) ve agregalar arasındaki boşluk oranları (VMA) tespit edilmiştir (Tablo 7.7). Daha sonra numuneler Marshall deney aletinde kırılarak Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Optimum bitüm içeriklerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 7.11’de gösterilmiştir. %10 CR modifiyeli B160/220 ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen örnek sonuçlar Tablo 7.8 ve 7.9 ayrıca Şekil 7.16-7.20’ de verilmiştir.

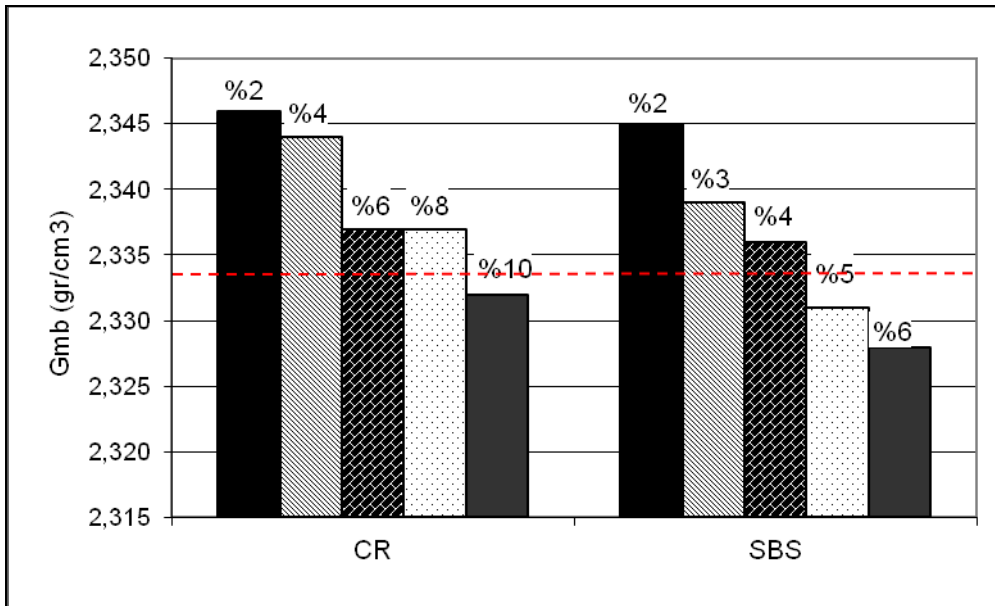
Tablo 7.7. Karışımların Hacimsel ve Fiziksel Özellikleri.

Karışım tipi	Optimum Bitüm Oranı (%)	Gb (gr/cm ³)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
Saf	4.90	1.0282	2.348	2.447	4.07	14.78	71.90
2%CR	5.05	1.0310	2.346	2.444	4.01	14.89	73.06
4%CR	5.20	1.0339	2.344	2.439	3.93	15.10	73.99
6%CR	5.31	1.0359	2.337	2.437	4.07	15.42	73.58
8%CR	5.44	1.0377	2.337	2.433	3.96	15.55	74.51
10%CR	5.57	1.0390	2.332	2.429	4.01	15.82	74.64
2%SBS	5.02	1.0268	2.345	2.443	4.00	14.89	73.13
3%SBS	5.14	1.0259	2.339	2.439	4.11	15.24	72.93
4%SBS	5.26	1.0253	2.336	2.435	4.07	15.42	73.62
5%SBS	5.38	1.0232	2.331	2.431	4.10	15.71	73.82
6%SBS	5.50	1.0226	2.328	2.427	4.08	15.91	74.37



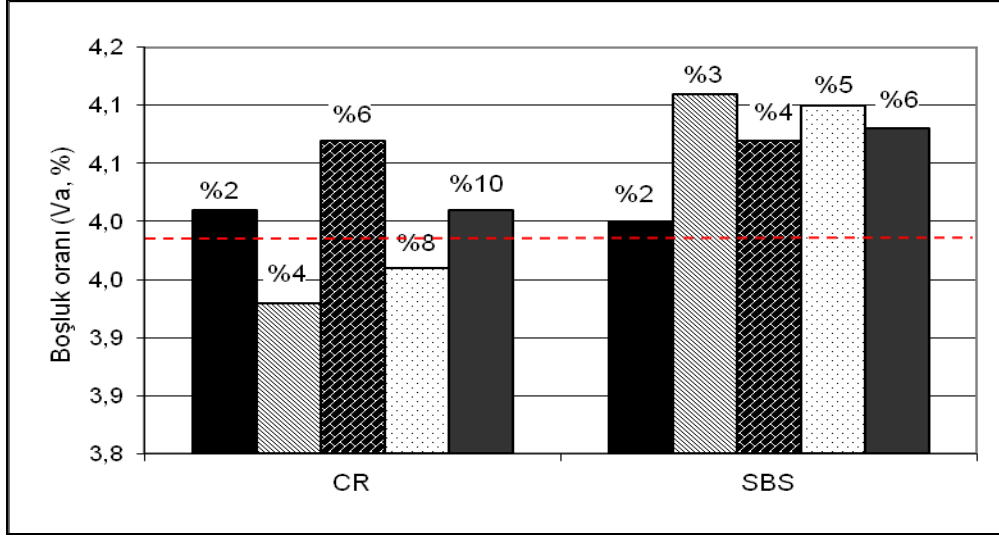
Şekil 7.11. Karışımların Optimum Bitüm İçerikleri.

Katkı içeriğinin artması ile CR ve SBS modifikasyonunda optimum bitüm içerikleri artmaktadır. SBS ve CR modifikasyonunda aynı katkı oranında SBS modifikasyonu daha fazla optimum bitüm içeriği gerektirmektedir. Şekil 7.12’ de Gmb değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi verilmiştir.



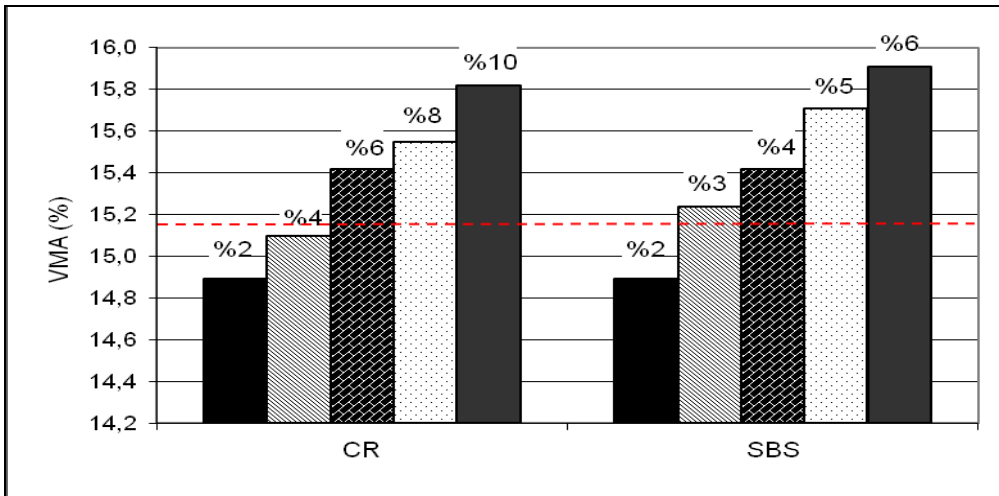
Şekil 7.12. Karışımların Pratik Özgül Ağırlıkları.

SBS ve CR modifiyeli karışımların pratik özgül ağırlıkları, artan katkı oranı ile birlikte, optimum bitüm içeriğinin artması ve birim hacmi, özgül ağırlığı agregaya göre daha düşük olan bitüm doldurması sebebiyle azalmaktadır. Şekil 7.13' te boşluk oranı ile katkı kullanımı arasındaki değişim verilmiştir.



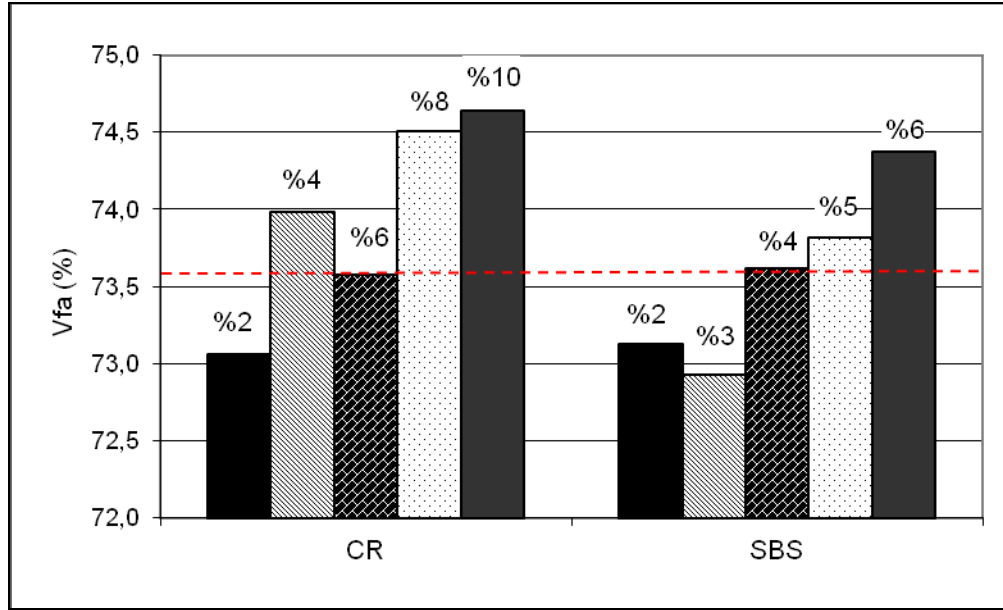
Şekil 7.13. Karışımların Boşluk Oranları.

Farklı katkı içeriğindeki her bir karışım kendi optimum bitüm içeriğinde hazırlandığından bütün karışımların boşluk oranları %3,90 ile %4,10 aralığında değişmektedir. Genel olarak SBS modifiyeli karışımların CR modifiyeli karışımlara göre daha az sıkıştıkları söylenebilir. Şekil 7.14' te VMA ile katkı kullanımı arasındaki değişim verilmiştir.



Şekil 7.14. Karışımların Boşluk Oranları.

Boşluk oranının bütün karışımlar için %4 oranında sabit olduğu düşünülürse hem CR hem de SBS modifiyeli karışımlarda katkı oranının artması ile VMA da medya gelen artışın bu karışımlarda artan katkı oranı ile birlikte artan optimum bitüm içeriğinin agregalar üzerinde daha kalın asfalt filmleri oluşturması söylenebilir. Şekil 7.15' te Vfa ile katkı kullanımı arasındaki ilişki verilmiştir.

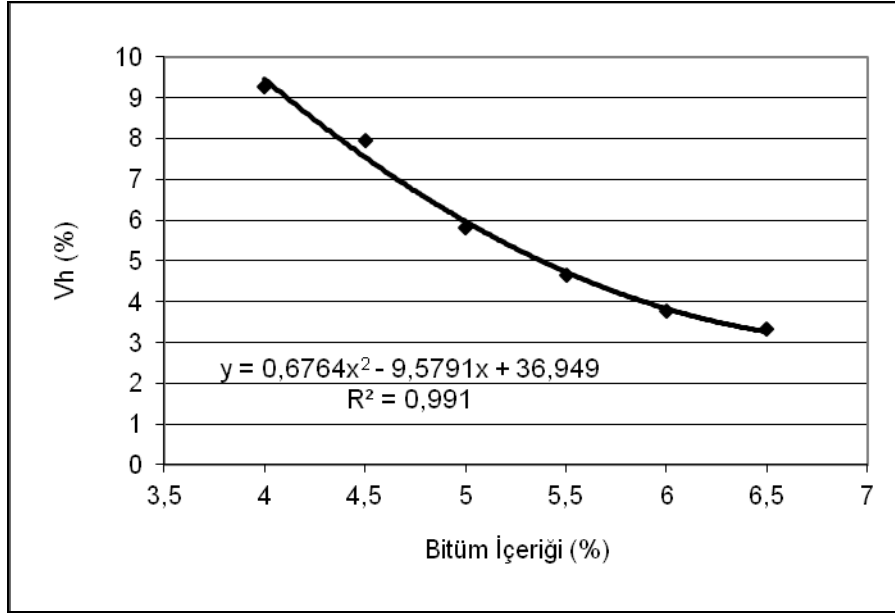


Şekil 7.15. Karışımların Boşluk Oranları.

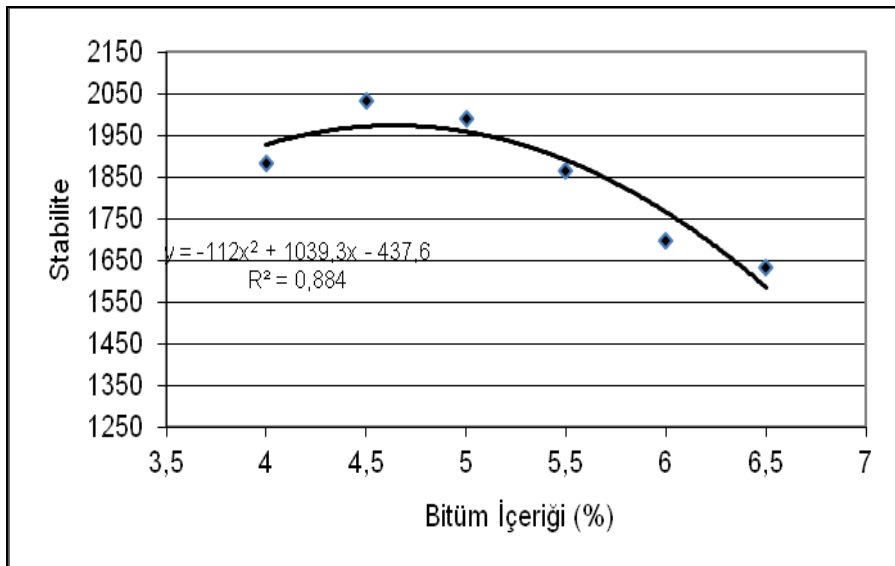
VMA da efektif bağlayıcı içeriğine bağlı olarak meydana gelen artışa paralel olarak VFA'lar da artan katkı içeriği ile artış meydana gelmektedir.

Tablo 7.8. B160/220 + %10 CR Modifiyeli Bitüm İle Hazırlanan BSK Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar.

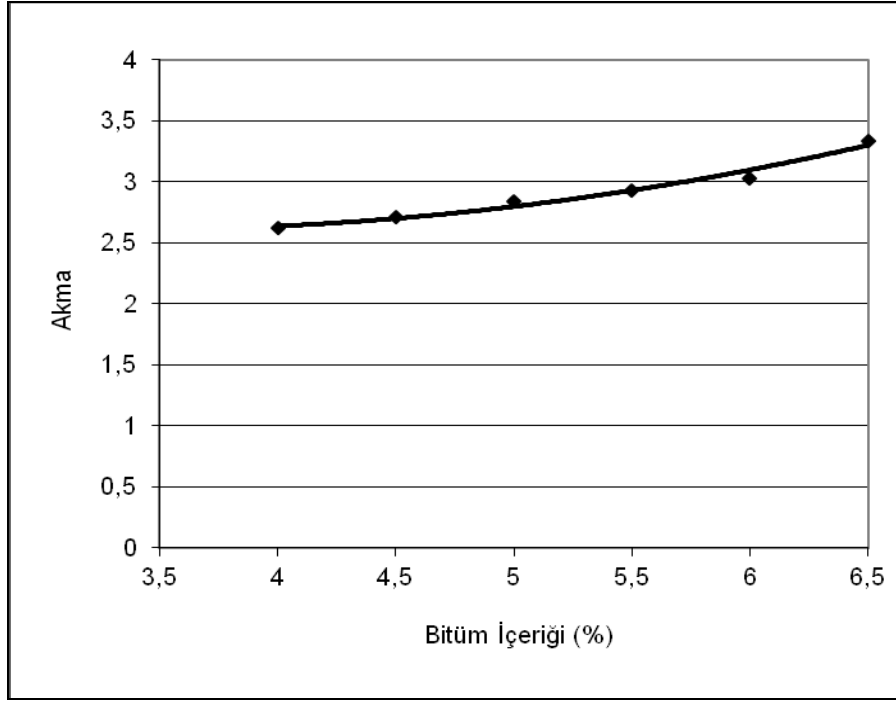
Wa	No	Numune yükseklikleri				Havada ağırlık (g)	Suda ağırlık (g)	Doy.yüz. Ağırlık (g)	Gmb (gr/cm ³)	Gmm (gr/cm ³)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stabilite (kN)	Akma (mm)
		1	2	3	ort										
4	1	67,3	66,9	67,8	67,3	1242,68	703,14	1247,21	2,284	2,509	8,89	16,30	44,91	19,28	2,59
	2	68,9	67,3	67,5	67,5	1242,96	700,67	1248,96	2,267	2,509	9,66	16,93	42,93	18,63	2,78
	3	67,7	67,7	67,4	67,4	1241,36	702,23	1246,67	2,280	2,509	9,14	16,45	44,44	18,59	2,48
	Ort								2,277	2,509	9,26	16,56	44,09	18,83	2,62
4,5	1	66,7	66,6	67,1	67,1	1249,44	706,99	1251,73	2,294	2,493	7,98	16,35	51,21	20,76	2,64
	2	66,7	66,7	67,4	67,4	1249,3	706,05	1251,47	2,291	2,493	8,10	16,47	50,78	20,50	2,99
	3	66,5	66,8	67,0	67,0	1246,76	706,74	1249,331	2,298	2,493	7,81	16,20	51,79	19,75	2,51
	Ort								2,294	2,493	7,965	16,340	51,260	20,34	2,71
5	1	66,7	66,2	66,0	66,3	1255,15	715,85	1257,0	2,319	2,476	6,33	15,82	60,01	20,55	2,78
	2	67,1	66,4	67,4	67,0	1252,87	723,83	1254,67	2,360	2,476	4,68	14,34	67,36	19,27	2,69
	3	66,8	66,5	66,9	66,7	1251,43	713,21	1253,44	2,316	2,476	6,44	15,92	59,53	19,86	3,05
	Ort								2,332	2,476	5,817	15,360	62,297	19,90	2,84
5,5	1	67,1	66,1	66,9	66,9	1260,63	722,64	1262,65	2,334	2,460	5,10	15,67	67,46	18,94	3,11
	2	66,1	65,5	66,4	66,4	1260,07	725,47	1261,40	2,351	2,460	4,42	15,07	70,66	19,00	2,87
	3	66,6	66,6	66,5	66,5	1258,86	724,96	1260,33	2,351	2,460	4,41	15,06	70,70	17,97	2,82
	Ort								2,346	2,460	4,644	15,267	69,608	18,63	2,93
6,0	1	65,8	66,1	66,5	66,1	1265,25	727,59	1266,14	2,349	2,444	3,88	15,53	75,03	17,60	2,88
	2	66,1	66,2	66,6	66,3	1265,91	728,36	1266,63	2,352	2,444	3,78	15,45	75,54	17,05	3,22
	3	66,8	66,7	66,4	66,6	1264,75	728,09	1265,29	2,354	2,444	3,67	15,36	76,07	16,25	2,99
	Ort								2,352	2,444	3,777	15,445	75,548	16,97	3,03
6,5	1	66,2	66,5	67,1	66,6	1270,37	730,94	1271,29	2,351	2,429	3,20	15,87	79,84	16,26	3,45
	2	66,3	66,8	66,5	66,5	1271,26	729,89	1272,05	2,345	2,429	3,46	16,09	78,53	16,76	3,22
	3	66,7	66,4	66,6	66,5	1270,49	730,43	1270,49	2,347	2,429	3,37	16,02	78,97	15,93	3,35
	Ort								2,348	2,429	3,341	15,995	79,113	16,32	3,34



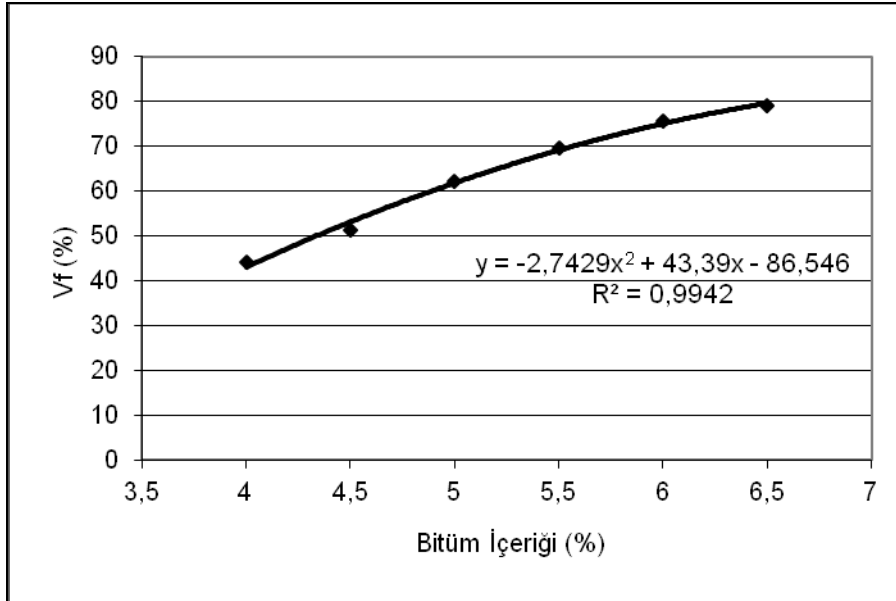
Şekil 7.16. B 160/220 + % 10 CR modifiye Bitüm İle Hazırlanan Numunelerin vh - % Bitüm İlişkisi.



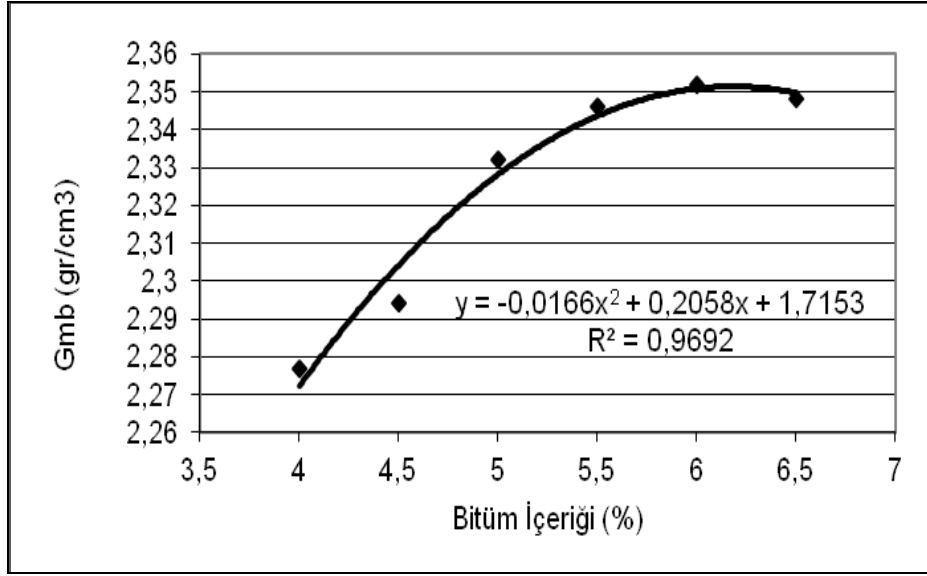
Şekil 7.17. B 160/220 + % 10 CR bitüm ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi.



Şekil 7.18. B 160/220 + % 10 CR Bitüm İle Hazırlanan Numunelerin Akma - % Bitüm İlişkisi.



Şekil 7.19. B 160/220 + % 10 CR Bitüm İle Hazırlanan Numunelerin Vf - % Bitüm İlişkisi.



Şekil 7.20. B 160/220 + % 10 CR Bitüm İle Hazırlanan Numunelerin Gmb - % Bitüm İlişkisi .

Karayolları genel Müdürlüğü tasarım kriterleri olan çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdelere, boşluk oranının % 4'e, asfaltla dolu boşluk oranının (V_f) % 70'e tekabül ettiği yüzdelere alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Tablo 7.9, optimum bitüm içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir.

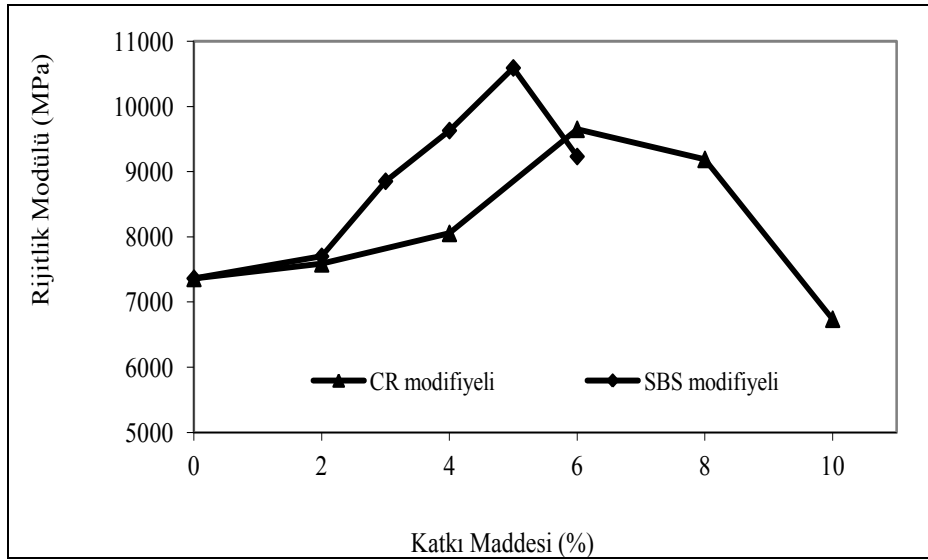
Tablo 7.9. B 160/220 + %10CR Bitümü İle Hazırlanan Karışımların Optimum Bağlayıcı Oranlarının Tespitinde Kullanılan Değerler.

Kriterler	Elde Edilen Değerler
Maksimum Stabilité	4,80
Maksimum Gmb	6,20
% 4 V _h	5,80
% 70 V _f	5,50
Optimum	% 5,575

7.4.2 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Deney 5°C sıcaklıkta deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 5 µm, yükleme periyodu 3 sn, yük etki süresi 0,124 sn poisson oranı (0,35)

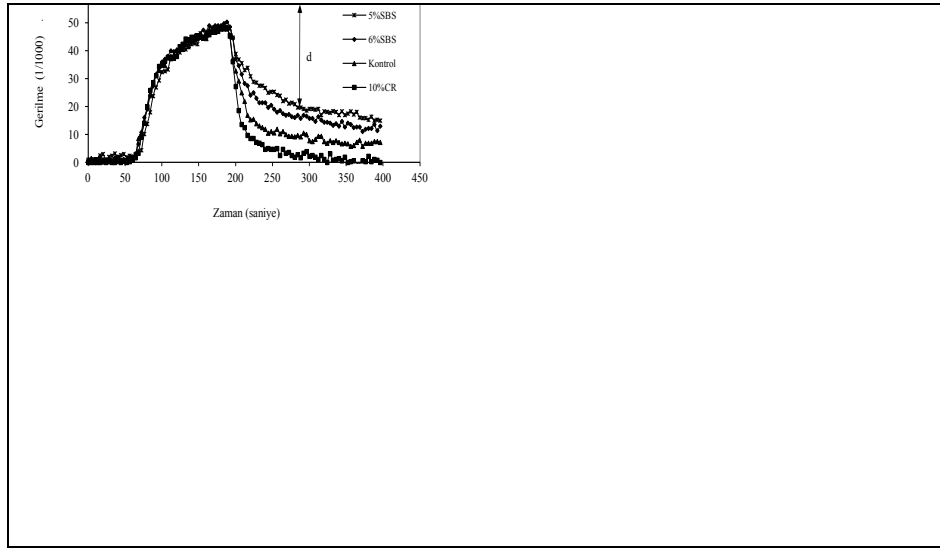
olarak alınmıştır. Yükleme başlığı pnömatik olarak çalışan cihaz, ilk önce numunede 5 μ m deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü ayarlayan cihaz, gerçek yüklemeleri yapmakta ve her darbeye 5 μ m deformasyon oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuçta 5 yüklemenin ortalama değerini ve standart sapmaları vermektedir. Deneylerde standart sapması %10'dan fazla olan numuneler iptal edilmiştir. Deneyde her bir karışım tipi için üçer numune test edilmiş ve herbir numunenin üç ayrı yerinden yükleme yapılmıştır. Şekil 7.21'de numunelerin rijitlik modülü değerlerinin katkı oranı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 7.21 Rijitlik Modülü Değerlerinin Katkı Oranı İle Değişimi.

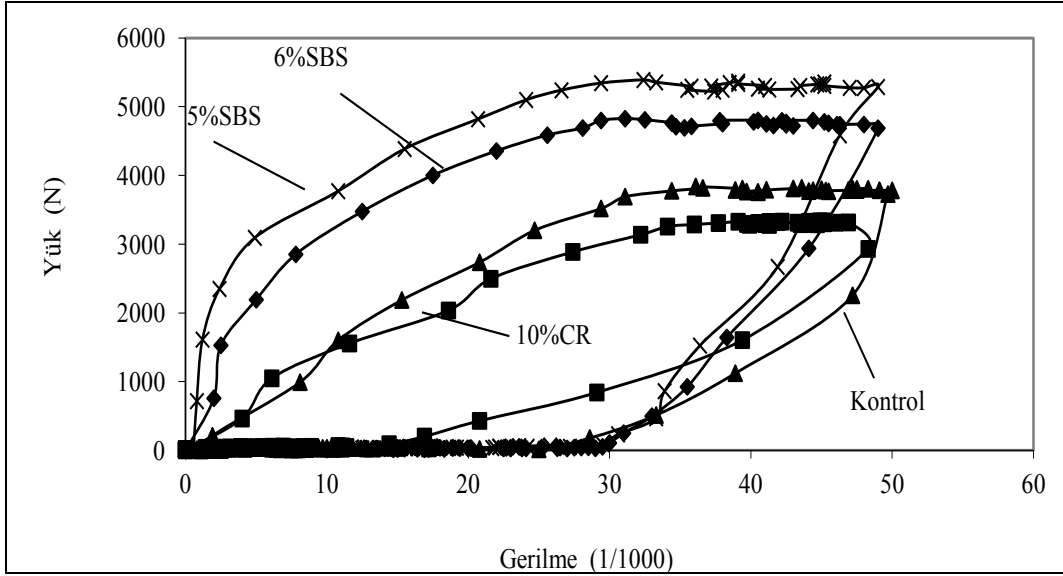
CR modifiyeli karışımların rijitlik modülleri 6736 MPa ile 7586 MPa arasında değişirken SBS modifiyeli karışımların rijitlik modülü değerlerinin en düşüğü 7700 MPa dır. Şekilden görüldüğü üzere SBS modifikasyonu için %5 CR modifikasyonu için %6 katkı oranına kadar rijitlik modülleri artmakta daha yüksek katkı oranları ise rijitlik modülünde azalmaya neden olmaktadır. Deney düşük sıcaklıkta deformasyon kontrollü olarak yapıldığından düşük rijitlik modülü yüksek esnekliğe işaret etmektedir. SBS modifiyeli karışımların rijitlik modülleri kontrol karışımınıninkinden fazla iken, özellikle yüksek orandaki (%10) CR modifiyeli karışımlar kontrol karışımından daha az rijitlik göstermiştir.

Numunelerin elastikliği belirli bir zaman sonra geri dönen şekil değiştirmeleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Şekil 7.22’de beş defa uygulanan dinamik yüklemenin bir yük uygulanması esnasında kontrol, %5 ve %6 SBS ve %10 CR modifiyeli karışımların zaman ve şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir. Şekile göre %10 CR modifiyeli karışımlar en yüksek geri dönen şekil değiştirmeye sahiptir. %5 ve %6 SBS modifiyeli karışımların geri dönen şekil değiştirmeleri dikkate alınan deney şartları için kontrol numunesininkinden az olmuştur.



Şekil 7.22 Gerilme – Zaman ilişkisi.

Bir başka değerlendirme Şekil 7.23’te verilen yük-şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Deformasyon kontrollü olarak yapılan deneyde şekil değiştirmeler maksimum yük değerinde 5 μ m değerine ulaştıktan sonra yükün kalkması ile birlikte 0 değerine gelmektedir. Bu şekilde elde edilen eğriler altında kalan alan absorbe edilen elastik enerjiyi ifade etmektedir. %10 CR modifiyeli karışımlar en düşük alana sahip olarak iyi bir enerji dağıtma kabiliyeti sergilemiştir.



Şekil 7.23 Yük-Şekil Değiştirme İlişkisi.

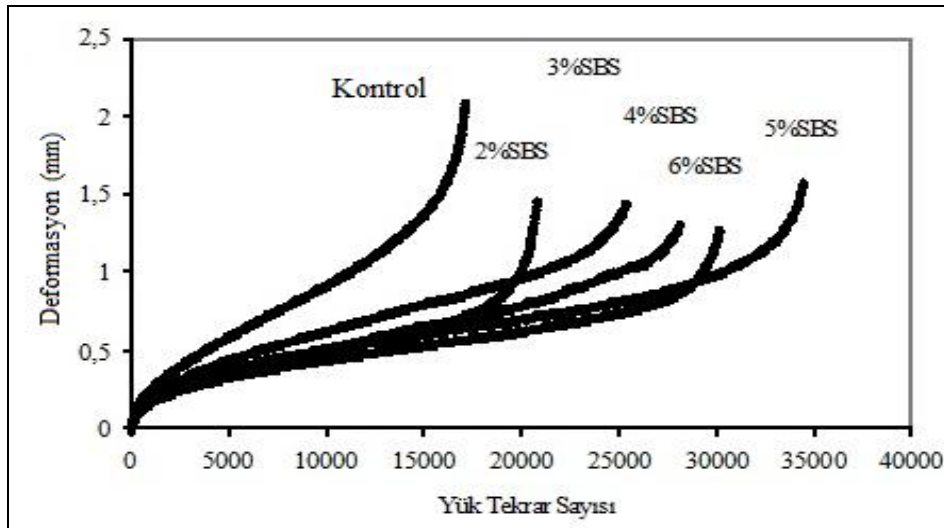
7.4.3 İndirek Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Deney gerilme kontrollü olarak 5 °C’de yapılmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce 6 saat test sıcaklığında bekletilmiştir. Gerilme seviyesi 500 kPa yk etki süresi 0,1 saniye ve yükleme periyodu 1,5 saniye olarak seçilmiştir. Bilgisayar kontrollü olarak çalışan cihazda yük tekrar sayısına bağlı olarak meydana gelen düşey deformasyonlar tespit edilmiştir. Deney, numuneler kırılncaya kadar devam ettirilmiştir. Şekil 7.24 ve Şekil 7.25’te SBS ve CR modifiyeli karışımların yük tekrarı ve deformasyon ilişkisi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere eğriler  bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde hacimsel deformasyona maruz kalan numunelerde hızlı bir deformasyon artışı olmakta daha sonra deney gerilme kontrollü olarak yapıldığından deformasyon artışında lineer bir bölüm ve son olarak çatlak oluştuktan sonra hızlı bir deformasyon artışı gösteren üçüncü bölüm söz konusudur.

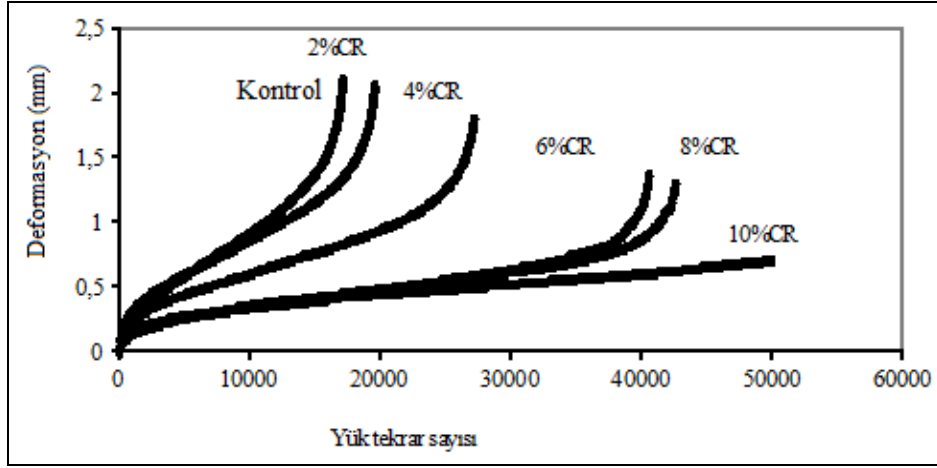
SBS modifiyeli karışımlar içinde en yüksek yük tekrar sayısına %5 katkılı karışımlar sahip olmuştur. CR modifikasyonunda katkı oranının artması ile yük tekrar sayıları artmaktadır. %6 ve %8 CR modifikasyonu benzer performans göstermiştir. %10 CR modifiyeli karışım 50000 yk tekrarında bile üçüncü bölgeye geçmeyerek üstün bir performans göstermiştir. %8 CR modifiyeli karışımın yük tekrar sayısı kontrol

karışıminkinden 2,7 kat daha fazla olmuştur. Deney sonuçlarına göre yüksek orandaki CR modifikasyonunun SBS modifikasyonuna göre düşük sıcaklıkta tekrarlı yüklere çatlak oluşmadan daha uzun süre direnç göstereceği tespit edilmiştir.

SBS modifikasyonunda düşük sıcaklık performansı ile yüksek sıcaklık performansları arasındaki fark BBR deneyinin yanı sıra bu deneyde de açığa çıkmaktadır. %6 SBS modifikasyonu yüksek sıcaklıkta sağladığı en yüksek performansı düşük sıcaklıkta yapılan yorulma deneyinde sağlayamamıştır. BBR deneyi de düşük sıcaklık için tespit edilen bu sonucu doğrulamaktadır. Burada %6 SBS modifikasyonu diğer SBS modifikasyonlarından bir derece daha düşük performans derecesi vermiştir. Ancak %6 SBS için tespit edilen bu rijitlik artışı, yine düşük sıcaklıkta yapılan rijitlik modülü deneyinde tespit edilmemiştir. Bu durumun söz konusu olan deney yöntemlerinden birisinin modifiyeli karışımları değerlendirmede uygun olmadığı yada yüksek orandaki SBS içeriğinin bağlayıcı içerisinde tam ve üniform olarak dağılmadığı şeklinde açıklanabilir. İkinci durum doğru olarak kabul edilecek olursa %5'ten daha yüksek SBS modifikasyonu düşük sıcaklık için uygun olmamaktadır. Ayrıca %5 SBS modifiyeli karışımlar düşük sıcaklıkta ve yüksek gerilme seviyesinde kontrol karışımlarına göre 2 kat daha fazla yük tekrar sayısında kırılmaktadırlar.



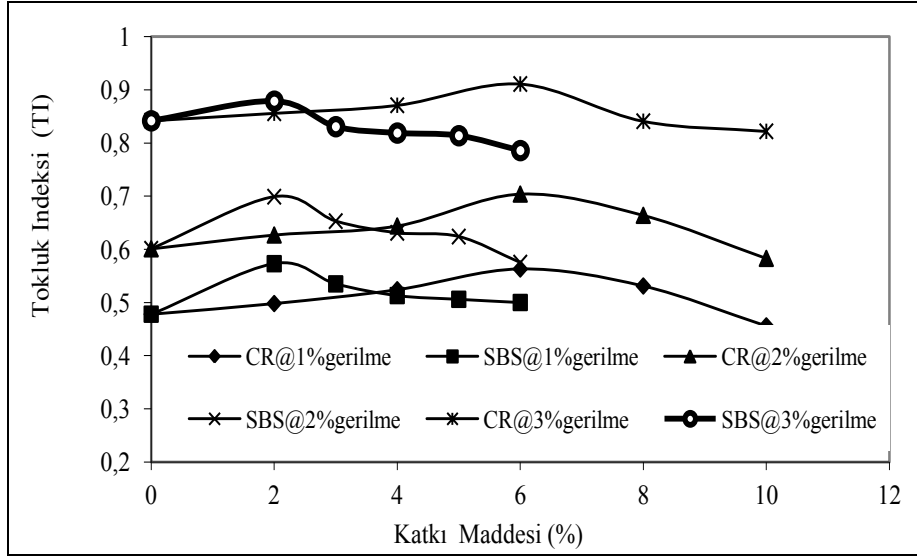
Şekil 7.24 Yük Tekrarı Ve Deformasyon İlişkisi (SBS).



Şekil 7.25 Yük Tekrarı Ve Deformasyon İlişkisi (CR).

7.4.4 Tokluk İndeksi Deney Sonuçları

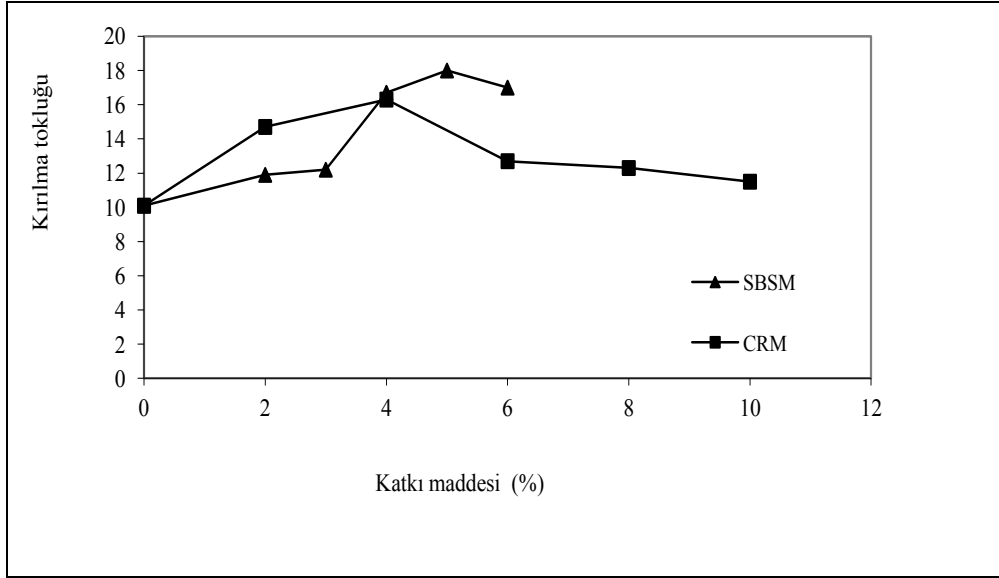
Deney 25 °C’de Marshall stabilite aleti ile 50,8 mm/dakika yükleme hızında yapılmıştır. Tokluk indeksi belirlenirken her numune için %1, %2 ve %3 şekil değiştirme seviyeleri ayrı ayrı olarak ele alınmıştır. Şekil 7.26’ da değişik şekil değiştirme seviyeleri için CR ve SBS modifiyeli karışımların tokluk indeksi değerlerinin katkı oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere SBS modifikasyonunda %2 katkı oranından sonra tokluk indeksi değerleri üç şekil değiştirme oranında da düşmektedir. CR modifikasyonunda ise tokluk indeksi değerleri %6 katkı oranına kadar artmakta ve sonra azalmaktadır. %2 SBS ve %6 CR modifikasyonu en yüksek elastisiteye neden olmuşlardır. Bu sonuca göre yüksek katkı oranındaki karışımların yorulma ömürlerinin düşük olması beklenir ancak yorulma deneyinde katkı oranının artması ile birlikte yük tekrar sayıları artmaktadır. Bu çelişkinin tokluk indeksi deneyindeki yüklemenin deformasyon kontrollü, yorulma deneyinde ise gerilme kontrollü oluşundan ve/veya deney sıcaklıklarındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tokluk indeksi deneyi kendi içinde numunelerin esneklik ve kırılganlıkları hakkında karşılaştırma imkanı vermekte ve sonuçta yüksek katkı oranında CR modifikasyonunda tokluk indeksi değerlerinin daha yüksek olduğu dolayısıyla daha esnek oldukları söylenebilir.



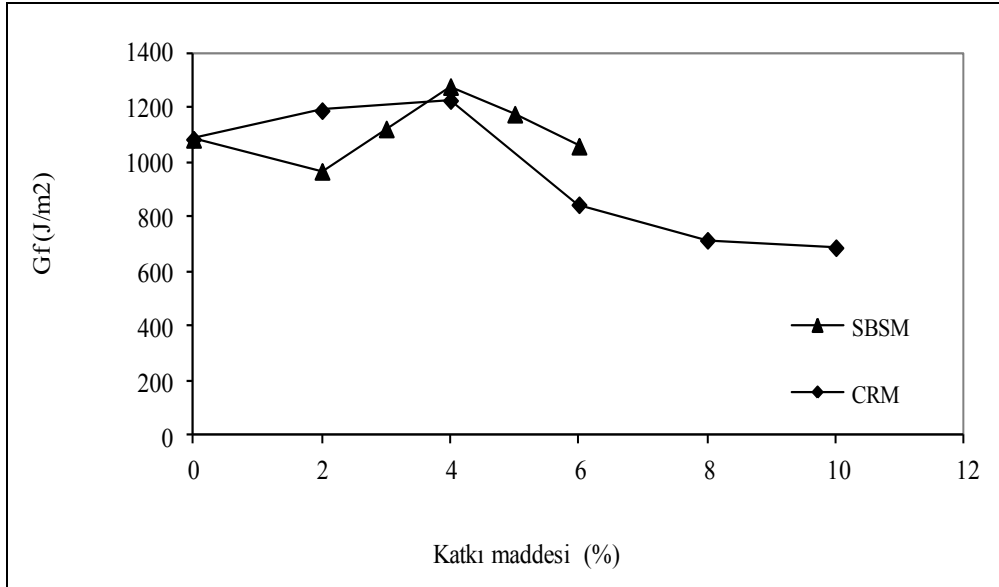
Şekil 7.26 Tokluk İndeksi Değerlerinin Katkı Oranı İle Değişimi.

7.4.5 Yarım Daire Eğilme Deney Sonuçları

Yoğurmalı pres ile 150 mm çapında hazırlanan numunelere 0 °C’de 5 mm/dk yükleme hızında yük uygulanarak çatlak ilerleyişine karşı dirençler belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın, numunelerde 10 mm yüksekliğinde numune kalınlığınca açılan çatlak yüzey alanına bölünmesi ile tespit edilen kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Şekil 7.27 ve 7.28’ te numunelerin kırılma toklukları ve kırılma enerjilerinin katkı oranı ile değişimi verilmiştir. Kırılma tokluğu değerleri SBS modifikasyonunda %5’e CR modifikasyonunda ise %4 katkı oranına kadar artmış daha sonra azalışa geçmiştir. Kırılma enerjileri de benzer bir eğilim izlemiştir. %4 katkı oranına kadar kırılma tokluğu ve kırılma enerjileri CR modifikasyonuna yüksek iken bu orandan sonra SBS modifikasyonunda yüksek olmaktadır.



Şekil 7.27 Kırılma Toklukları ve Kırılma Enerjilerinin Katkı Oranı İle Değişimi.



Şekil 7.28 Kırılma Toklukları ve Kırılma Enerjilerinin Katkı Oranı İle Değişimi.

8. SONUÇ

Bu çalışmada bitüme ağırlıkça farklı oranlarda öğütülmüş atık araç lastiği ve SBS ilave edilerek bağlayıcılar üzerinde reolojik ve bu bağlayıcılarla hazırlanan karışım numuneleri üzerinde fiziksel deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır

DSR deney sonuçlarından, SBS modifikasyonu ile ulaşılan tekerlek izi parametresini elde etmek için CR oranının SBS oranından çok yüksek olması gerektiği tespit edilmiştir. Aynı ve yüksek tekerlek izi parametresinde CR modifikasyonu daha düşük faz açısına dolayısıyla elastik davranışa sahip olmuştur.

BBR deneyinde hiçbir bağlayıcının sünme rijitliği değeri en düşük sıcaklıkta bile 300 MPa değerini geçmemiş dolayısı ile bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesinin tespitinde sünme oranı değerleri belirleyici olmuştur. -18 °C'de en yüksek oran olan %10 CR modifikasyonunun sünme rijitliği değeri saf bağlayıcının sünme rijitliğinden bile %30 daha düşük çıkmıştır. Reolojik testler sonucunda %2 ve %3 SBS modifikasyonu aynı zamanda %4 ve %6 CR modifikasyonu PG 64-34 performans seviyesini sağlarken, %4 SBS, %8 ve %10 CR modifikasyonu PG 70-34 performans seviyesini sağlamıştır.

Düşük sıcaklıkta yapılan rijitlik modülü deneyinde SBS modifiyeli karışımların rijitlik modülü değerleri kontrol numunelerinden yüksek çıkarak bu karışımların düşük sıcaklıkta daha az şekil değiştirme göstereceğine işaret etmiştir. %10 CR modifiyeli karışımların en yüksek geri dönen elastik şekil değiştirmeye sahip oldukları ve minimum yük-şekil değiştirme alanına sahip olarak yük altında yüksek bir enerji dağıtma kabiliyetinin olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma deneyine sonuçlarına göre %5 SBS ve %10 CR modifiyeli karışımlar en yüksek yük tekrar sayısına sahip olmuşlardır. % 10 CR modifiyeli karışımlar %5 SBS modifiyeli karışımlardan 2 kattan daha fazla yorulma performansı sergilemiştir.

CR modifikasyonu özellikle yüksek katkı oranlarında SBS modifikasyonundan daha fazla tokluk indeksi değerlerine sahip olarak yük altında oluşacak çatlaklar arasında köprü oluşturabilecek bir kabiliyet göstermiştir. % 2 SBS ve % 6 CR modifikasyonu en yüksek elastikliğe sebep olmuşlardır. Aynı zamanda tokluk indeksi deneyi ile yorulma deneyi arasında farklı yükleme modları nedeniyle ilişki kurulamayacağı tespit edilmiştir.

CR modifikasyonu kırılma mekanizmasının birinci bölümü olan çatlak oluşumuna karşı yüksek bir direnç gösterirken hesaplanan kırılma enerjilerine göre %4 katkı oranından sonra çatlak ilerleyişine karşı önemli bir direnç gösterememiştir.

Bütün testler sonucunda öğütülmüş atık araç lastiği ile modifiye edilen karışımların soğuk iklimli bölgelerde düşük sıcaklık çatlaklarıyla mücadelede etmede başarıları olacağı tespit edilmiştir. Diğer taraftan %4'ten daha fazla CR modifikasyonunda çatlak oluştuktan sonra bu kaplamaların hızlı bir şekilde onarılması ekonomik bir rehabilitasyon için gerekli olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, CR modifikasyonu ile SBS modifikasyonunun daha çok düşük sıcaklık davranışı bakımından karşılaştırılması sonucunda, CR modifikasyonunun SBS modifikasyonuna alternatif olabileceği ve bu sayede çok önemli ekonomik kazançların sağlanması ile birlikte atık lastiklerin çevrede oluşturacağı tehlikelerin de kolay bir şekilde önlenileceği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G., 1998, Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Altaş, Ö.Y., 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.

Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M., and Sasani, A.R., 2010. The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 24, 6, 1060-1068.

Asfalt El Kitabı, 2002, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.

Asfalt ve Uygulamaları, 2001, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 280s.

Balta, İ., 2004, Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224s.

Bek, A., 2007. 2004 Yılında İstanbul-Ankara Devlet yolunda meydana gelen ölümlü, yaralanmalı trafik kazalarının hava durumu, yol satıh durumu ve yoldaki yön durumuna bağlı olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bekheet, W., Helali, K., Kazmierowski, T., Ningyuan, L., 2005, Integration of Preventive Maintenance in the Pavement Preservation Program Ontario Experience, *Transportation Research Circular*, Roadway Pavement Preservation 2005, Kansas City, Missouri, pp. 87-98.

Bell, C. A., Sosnovske, D. ve Wieder J. A., 1992. Aging, Binder Validation, National Research Council, Washington D.C., 384-385 .

- Birliker, R.Y.**, 1998. Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü.Fen Bil. Enst., İstanbul, 208 s.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S., Zhang, J.**, 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt, NCAT Report 01-05, Auburn, 79p.
- Ceran, M.B.**, 2007. Lojistik Sektöründe Geçerli Olan İstiap Hadleri'nin Ülkemizdeki ve Diğer Ülkelerdeki Durumu, Konya Ticaret Odası Araştırma Raporu, 10s.
- Cooper, B. S.**, 2008. Characterization Of Hma Mixtures Containing High Recycled Asphalt Pavement Content With Crumb Rubber Additives, B.S.C.E. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Çakıroğlu, M.**, 1996. Yol Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar, 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, İSFALT, İstanbul, s.154-163.
- Çubuk, K., M.**, 2001. Karayolu Üstyapısında Meydana Gelen Bozulmalar ve Çözüm Önerileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Ankara, 14(1): 221-230
- Dinç, E.**, 1999. Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
- Erel, A.**, 1978. Düşey Dinamik Dingil Yükleri Altındaki Demiryolu yapısında Taban Zeminlerinin Taşıma Güçlerine Bağlı Olarak Minimum Balast Kalınlığının Hesaplanması, *Doktora Tezi*, İstanbul.
- Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, 352 p. London and New York.
- Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ghile, D.B.**, 2006. Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, *MSc Thesis*, Delfth University of Technology, Delfth.

Gönüllü, M., T., 2004. Atık Lastiklerin Yönetimi, Katı Atık Geri dönüşüm Teknolojileri Semineri İSO, İstanbul.

Gürer, C., 2005. Atık Mermer Parçalarının Yol Kaplamasında Değerlendirilmesi” *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Hamzah, M.O., Mohamed A.A., and Ismail, H., 2006. Laboratory Investigation of The Properties of a Newly Developed Crumb Rubber Modified (Cr1) Asphalt Mixtures *Emirates Journal for Engineering Research*, 11(2), 67-72.

Harold, R., Paul, P.E., Chris, P.E., 1995. Pavement Distress, Technical Assistance Report, LTRC, PP. 14-15.

Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 22-27.

Kabir, M.S., 2008. Effect of Hydrated Lime on The Laboratory Performance of Superpave Mixtures. *Ph.D.Thesis* University of Engineering and Technology, Bangladesh.

Karavaşin, M., 2007. Aşırı Dingil Yüklemesinin Karayollarına Verdiği Zararlar, T.C. Ulaştırma Bakanlığı.

Karayolları Trafik Yönetmeliği, 2003. İçişleri, Bayındırlık ve İskân ve Ulaştırma Bakanlıkları, 117s.

Karayolu Bakım El Kitabı, 1998. Karayolları Genel Müdürlüğü Bakım Dairesi Başkanlığı, Ankara, 478s.

Keçeciler, A. F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F., 1990. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 37- 54.

Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., 1994. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The [72] Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.

Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu (KSÖİK), 2006. Araç Lastiği Çalışma Grubu Raporu, Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Ankara.

Kök, B. V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Yılmaz, M., Kök, B.V., 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak.Der.* 23, 4, 811-819.

Kök, B.V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Kuloğlu, N., 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *Türk J Engin Environ Sci*, s.61-67.

Kurtis, K., 2003. Asphalt and Asphalt Concrete, Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, Atlanta, Georgia, pp. 14-18.

Kutluhan, S., Agar, E., 2004. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Olusumunun İncelenmesi, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 213-223.

Loh, S., Olek, J., 1999. Contributions of PG Graded Asphalt to Low Temperature Cracking Resistance of Pavement, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22, Perdue University, Indiana, 172p.

Lu, X., Isacsson, U., 2001. Modification of Road Bitumens With Thermoplastic Polymers. *Polym Test*, 20, 77–86.

McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p.

Molenaar, A.A.A. ve Medani, T.O., 2000. Rational Testing Methods for Performance Based Specifications, Proceedings of the 1st International Conference World of Asphalt Pavements, Sydney, Australia, July 7-10, 484-500.

Navarro, F.J., Partal, P., Martı´nez-Boza, F., and Gallegos, C., 2004. Thermo-Rheological Behaviour and Storage Stability of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, *Fuel* 83, 2041–2049.

Orhan, F., 2006. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları T.C. Bayındırlık Ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2,4-6,19-20,28-29.

Oruç, Ş., 1997.Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçersindeki Performansının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Önal, A. M., Kahramangil, M., 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı” T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara 7, 16-18, 26-29,179-185.

Özden, B., ve Türer, A., 2005. Ucuz Araba Lastiği Yastığı (ALY) Kullanarak Sismik İzolasyon, YDGA2005: Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı Bildirileri, ODTÜ Kültür Kongre Merkezi, Ankara, sy: 1-8.

Öztürk, A., Çubuk, K., M., 2004. Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 19(2): 175-184.

Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., 2004. Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*,19, 2, 175-184.

Pereira, A.A. P., Pais, C.J., and Triches, G., 2006. Performance Of Wet Process Method Alternatives: Terminal Or Continuous Blend, Department Of Civil Engineering, Campus Of Azurem.

Pereira, A.A. P., PAÍS, C.J., Triches, G., Performance of Wet Process Method Alternatives: Terminal or Continuous Blend, Department of Civil Engineering, Campus Of Azurem 4800-058 Guimaraes, Portugal, University Federal of Santa Catarina Rua Joao Pio Duarte Da Silva, 205 88040-970 Florianopolis, SC, Brasil.

Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., et.al., 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 197p.

Reubush, S.D., 1999. Effects of Storage on the Linear Viscoelastic Response of Polymer- Modified Asphalt at Intermediate to High Temperatures, Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351p.

Saltan, M., 1999. Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 202s, Isparta.

Sengöz, B., Agar, E., 2005. Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına Etkisi, *İTÜ Dergisi*, 4 (1), 71-82.

Sezgin, H., 2003. Karayolları Esnek Üstyapılarında Alttemel Tabakasının Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 105s, Isparta.

Shell Bitüm El Kitabı, 2004. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.

Silvrano A. Dantas Neto, Márcio M. Farias, Jorge C. Pais, and Paulo A. A. Pereira, 2006. Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties, Federal University of Ceara Department of Hydraulic and Environmental Engineering.

Silvrano A. Dantas Neto, Márcio Muniz de Farias and Luiz Guilherme R. Mello, Paulo Pereira and Jorge Carvalho Pais., 2005. The Use Of Crumb Rubber In Asphalt Mixtures Using The Dry Process, Pos-graduate Program in Geotechnics, University of Brasilia.

Simms, S.A., 1998. Use of Coal Fly Ash in Asphalt Concrete Mixes, *MSc Thesis*, Dalhousie University, Daltech, Canada.

Sugözü, İ., ve Mutlu, İ., 2009. Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1,1, 35-46.

Terzi, S., Karaşahin, M., 2004. Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Esnek Üstyapı Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, s.344-357.

The Asphalt Institute, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.

Traxler, R.N., 1963. Durability of Asphalt Cements, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, 32, 44-58.

TS 118 EN 1426., 2002. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar – İgne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 120 EN 1427., 2002. Bitümler ve Bitümü Bağlayıcılar-Yumusama Noktası Tayini - Halka ve Bilya Metodu”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12697-34+A1, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları için Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 4-6,89,121-122,258.

Tunç, A., 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 199-206, 210-211, 213-216, 220-225, 232-236, 247-252.

Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Evi, ISBN:975-6574-003 Temmuz, İstanbul.

Umar, F., Açar, E., 1991. Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 339s.

URL-1. Düünden Bugüne Karayolu Dökümanı, <http://www.kgm.gov.tr/>

URL-2 Atık Yönetimi, <http://www.cevreonline.com/>

URL-3 http://www.goodyear.com.tr/turkish/frm_index/goodyear_hakkinda.html

URL-4 <http://www.lassa.com.tr/lassaweb/sub.htm>

URL-5 <http://www.turkorecycling.com/>

URL-6 http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf, Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BiTVaL Project, FEHRL, 213p, Erişim Tarihi. 28.12.2007.

Wayne, J., and Magdy, A., 2006. Crumb Rubber in Performance-Graded Asphalt Binder., University of Nebraska – Lincoln, North Dakota State University.

Weidong, Cao., 2007. Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process. *Construction and Building Materials* 21, 1011–1015.

Whiteoak, D. and Read, J., 2003. The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.

Yeşilata, B., Bulut, H., Turgut, P., Demir, F., 2007. Atık Taşıt Lastiklerinin Geri Kazanımı ve Yalıtım Amaçlı Kullanımı, *MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi*.

Yıldırım, B., şiş, A., 2001. şartname Sınırlarındaki Agrega Granölometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm Oranına Etkisi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 2, 95-100, Elazığ.

Yılmaz, M., 2011. Asfaltitin Bütümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Zaniewski, J.P., Nallamothu, S.H., 2003. Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia, 76p.

Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109p.

Zoorob, S.E. ve Suparma, L.B., 2000. Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), *Cement&Concrete Composites*, 22, 233-242.

ÖZGEÇMİŞ

Alaaddin GEÇKİL, 1981 yılında Elazığda doğmuştur. İlkokulu Balakgazi İlkokulunda, orta okulu Atatürk ortaokulunda ve liseyi Elazığ Lisesinde tamamlamıştır. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmiş ve 2007 yılında mezun olmuştur. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı yüksek lisans programını kazanmıştır. 2012 yılında Niğde Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak göreve başlamıştır.

2013