

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKTİF TERPOLİMERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MAKSUT SELOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİSAN 2015

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKTİF TERPOLİMERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MAKSUT SELOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİSAN 2015

Tezin Başlığı : ‘‘Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması’’

Tezi Hazırlayan : Maksut SELOĞLU

Sınav Tarihi : 06.04.2015

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL**
İnönü Üniversitesi

Diğer Jüri Üyeleri: **Doç. Dr. Mehmet YILMAZ**
Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Taner ALATAŞ
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Alaattin ESEN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması’’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan özenle yazıldığını ve yararlandığım kaynakların, kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Maksut SELOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

REAKTİF TERPOLİMERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MAKSUT SELOĞLU

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

130 + xi sayfa

2015

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu tez çalışmasında; Reaktif Terpolimerin (Elvaloy Ret), bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar (BSK) performansı üzerindeki iyileştirme etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla, çalışmalar için seçilmiş olan B 100/150 penetrasyon sınıfı asfalt bağlayıcısına ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında Elvaloy Ret ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri; penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri ile incelenerek performans seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra, seçilmiş olan bir dizayn agrega gradasyonu alınarak saf ve Elvaloy Ret modifiyeli bağlayıcılarla Marshall dizayn yöntemi kullanılarak modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır. Elvaloy Ret'in bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkileri; Marshall stabilitesi ve akma, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve nem hassasiyeti, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM), dolaylı çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri ile incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, bağlayıcıların Elvaloy Ret ilave edilerek modifiye edilmesi ile yüksek ve düşük sıcaklık performans seviyelerinin arttığı, daha katı kıvama geldiği ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğü; bu bağlayıcılarla hazırlanan karışımların stabilitelerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, rijitliklerinin, kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve yorulma dirençlerinin arttığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELE: Bitüm, Bitümlü sıcak karışım, Marshall stabilitesi, Elvaloy Ret, Modifiye bitüm, Yorulma, Sünme, Kalıcı deformasyon.

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REACTIVE TERPOLYMER ON THE HOT MIX ASPHALT

MAKSUT SELOĞLU

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

130 + xi pages

2015

Supervisor: Asst. Prof. Tacettin GEÇKİL

In this thesis, the improval effects of the Reactive Terpolymers (Elvaloy Ret) on the performance of bitumen and hot mix asphalt (HMA) as additives were studied.

With this aim, the modified binders were obtained by adding Elvaloy Ret at the rates of 0.5%, 0.75% and 1.0% into the asphalt binder with the class of penetration B 100/150 chosen for the studies. The pure and modified binders' physical and rheological features were analyzed with the experiments of penetration, softening point, dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR) and rotational viscosimeter (RV), and their performance levels were given. Then the samples of the modified mixture were prepared using the Marshall design method with the pure and Elvaloy Ret modified binders after taking a chosen design aggregate gradation. The effects of Elvaloy Ret on the performance of the hot mix asphalt were dealt with the experiments of Marshall stability and flow, indirect tensile strength (ITS) and moisture sensitivity, indirect tensile stiffness module (ITSM), indirect tensile fatigue and dynamic creep.

As a result of these experimental studies, it was seen that the high and low temperature performance levels, more solid consistence and low sensitivity to temperature were a matter of subject when modified binders by adding Elvaloy Ret, and the stability, sensitivity to moisture damage, stiffness, resistance to permanent deformation and fatigue resistance of the mixtures prepared with these binders increased.

KEYWORDS: Bitumen, Hot mix asphalt, Marshall stability, Elvaloy Ret, Modified binder, Fatigue, Creep, Permanent deformation.

ÖNSÖZ

"Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2011-2015 yılları arasında yüksek lisans tez çalışması olarak hazırlanmıştır. Tezin ders döneminde bir dönem Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden ders alınmıştır. Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında da birçok deneysel çalışma (modifiye bitüm hazırlama, bağlayıcı performans deneyleri ve modifiye karışım deneyleri) yapılmıştır.

Tez boyunca yapmış olduğu katkılarından dolayı danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e öncelikle çok teşekkür ederim.

Kendisinden ders alarak bilgilerinden istifade ettiğim bölümümüzün değerli hocası Sayın Doç. Dr. Mahmut FIRAT'a, laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı laboratuvar teknisyeni İlhami BAYSAL'a ve özellikle laboratuvar deneysel çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve yardımına koşan arkadaşım Kimya Müh. Beran ÖNER'e şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalar için ulaştırma laboratuvarını kullanımımıza açan Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı değerli hocam sayın Prof. Dr. Necati KULOĞLU'na, gerek deneysel çalışmalarda gerek de deneysel yorumlamalarda yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a ve Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e, laboratuvar çalışmalarında desteklerinden ötürü arkadaşlarım Arş. Gör. Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU'na, Arş. Gör. Erkut YALÇIN'a ve Arş. Gör. Mustafa AKPOLAT'a teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yazdıkları makale, kitap ve yayınlarına başvurduğum kaynaklar kısmında adı geçen tüm araştırmacılara teşekkür ederim.

Son olarak dualarını ve maddi-manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Maksut SELOĞLU

Malatya-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) KAPLAMALAR.....	5
2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar	6
2.1.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri	7
2.1.1.1. Mineralojik Sınıflandırma	7
2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması	7
2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması	7
2.1.1.4. Biçim ve Yüzey Yapısı	8
2.1.1.5. Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk	9
2.1.2. Agregalara Uygulanan Deneyler.....	9
2.1.2.1. Dane Boyutu (Elek Analizi) Deneyi (ASTM C131 TS 1900).....	10
2.1.2.2. Aşınma (Los Angeles) Deneyi (AASHTO T96, TS EN 1097-2).....	10
2.1.2.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1).....	11
2.1.2.4. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8).....	11
2.1.2.5. Su Tesirine Karşı Dayanıklılık (Soyulma) Deneyi (ASTM D1664).....	11
2.1.2.6. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi (TS EN 1097-6).....	12
2.1.2.7. Yassılık ve İnce-Uzunluk İndekslerinin Tayini Deneyi (BS 812).....	13
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar.....	13
2.2.1. Bitümün Reolojik Davranışı.....	15
2.2.2. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	18
2.2.2.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5).....	21
2.2.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36).....	21
2.2.2.3. Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589).....	22
2.2.2.4. Frass Kırılma Noktası Deneyi (TS EN 12593)	23
2.2.2.5. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087).....	23
2.2.2.6. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi.....	24
2.2.2.7. Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi.....	25
2.2.2.8. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	26
2.2.2.9. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi.....	27
2.2.2.10. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	30
2.2.2.11. Doğrudan Çekme (DDT) Deneyi.....	31
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	32
2.3.1. Stabilitate.....	32
2.3.2. Rijitlik.....	32
2.3.3. Durabilite.....	33
2.3.4. Yorulma Mukavemeti.....	33

2.3.5. Esneklik.....	33
2.3.6. Geçirimsizlik.....	33
2.3.7. Kayma Direnci.....	34
2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar.....	34
2.4.1. Tekerlek İzi Oluşumu.....	34
2.4.2. Yorulma Çatlakları.....	35
2.4.3. Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	35
2.4.4. Kusma.....	36
2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri.....	36
2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	38
2.6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	38
2.6.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi.....	40
2.6.3. Modifiye Lottman (AASHTO T-283) Deneyi.....	41
2.6.4. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi	43
2.6.5. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi.....	45
2.6.6. Dinamik Sünme Deneyi.....	47
3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK)	
MODİFİKASYONU.....	49
3.1. Modifikasyonda Katkı Olarak Kullanılan Elvaloy Ret ve Özellikleri.....	53
3.2. Literatür Çalışması	55
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	62
4.1. Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi.....	62
4.2. Agregası Seçilmesi.....	63
4.3. Kullanılacak Katkı Oranlarının Seçilmesi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması...	63
4.4. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları.....	66
4.4.1. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılması.....	66
4.4.2. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Penetrasyon Deney	
Sonuçları.....	68
4.4.3. Saf ve Modifiye Bağlayıcıları Yumuşama Noktası Deney	
Sonuçları	70
4.4.4. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları.....	74
4.4.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları.....	79
4.4.6. Dönel Viskoizimetre (RV) Deney Sonuçları.....	82
4.5. Marshall Karışım Dizayn Yöntemi	86
4.5.1 Marshall Karışım Dizayn Yöntemi ile Deney Numunelerin	
Hazırlanması.....	87
4.5.2 Marshall Karışım Dizayn Yöntemi ile Optimum Bitüm Yüzdesi	
Bulunması.....	91
4.6. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri.....	99
4.6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	100
4.6.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T-283 Deney	
Sonuçları.....	105
4.6.3. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları.....	109
4.6.4. Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....	114
4.6.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları.....	117
5. SONUÇLAR.....	122

6. KAYNAKLAR.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	130

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı	8
Şekil 2.2. Agrega granülometrisi örneği.....	10
Şekil 2.3. Asfaltın kimyasal yapısı	14
Şekil 2.4. Bitümün farklı sıcaklık ve zamanlara göre davranışı	16
Şekil 2.5. Bitümün sıcaklık hassasiyeti	16
Şekil 2.6. Asfaltın yaşlanma süreci	18
Şekil 2.7. Penetrasyon deney aleti.....	21
Şekil 2.8. Yumuşama noktası deney düzeneği.....	22
Şekil 2.9. Düktilite deneyi.....	22
Şekil 2.10. Frass kırılma noktası deney düzeneği (a), numunede oluşan çatlak (b).....	23
Şekil 2.11. Dönel ince film halinde ısıtma kaybı deney düzeneği	24
Şekil 2.12. PAV deney aleti.....	25
Şekil 2.13. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi	26
Şekil 2.14. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi	27
Şekil 2.15. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a), üst plağa yerleştirilmesi (b)	28
Şekil 2.16. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri	28
Şekil 2.17. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği	29
Şekil 2.18. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi.....	29
Şekil 2.19. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti.....	30
Şekil 2.20. BBR deneyi için numune hazırlanması (a) ve deneyin yapılması (b).....	31
Şekil 2.21. Sünme oranının belirlenmesi.....	31
Şekil 2.22. Zayıf alt tabakada (a) ve kaplamada (b) tekerlek izi oluşumu	35
Şekil 2.23. Yorulma çatlaklarının dereceleri	35
Şekil 2.24. Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları	36
Şekil 2.25. Marshall stabilite ve akma deneyi cihazı.....	39
Şekil 2.26. ITS deneyi yükleme durumu (a)ve kırılma düzlemi (b).....	40
Şekil 2.27. Dolaylı çekme deneyi (a) ve şematik görünüşü (b).....	43
Şekil 2.28. Yorulma deney düzeneği.....	46
Şekil 2.29. Temsili deformasyon - yük tekrerrür sayısı ilişkisi.....	47
Şekil 3.1. Elvaloy Ret	53
Şekil 3.2. Elvaloy Ret'in kimyasal yapısı	54
Şekil 3.3. Bitümün Elvaloy ile tepkimesi	54
Şekil 4.1. Bitüme Elvaloy Ret (a) ve süper fosforik asit ilavesi (b).....	65
Şekil 4.2. Modifiye bitüm mikseri (a) ve karıştırma başlığı (b).....	66
Şekil 4.3. RTFOT yaşlandırma deney cihazı.....	67
Şekil 4.4. Bağlayıcıların kütle kaybı sonuçları	68
Şekil 4.5. Penetrasyon-katkı %'si değişimi.....	70
Şekil 4.6. Yumuşama noktası-katkı %'si değişimi.....	72

Şekil 4.7. Penetrasyon indeksi (PI)-katkı %'si değişimi.....	73
Şekil 4.8. Kompleks kayma modülü (G^*)- katkı içeriği	76
Şekil 4.9. Faz açısı (δ)- katkı içeriği	76
Şekil 4.10. Tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$)- katkı içeriği	77
Şekil 4.11. Tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$)- sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ilişkisi.....	77
Şekil 4.12. BBR kirişinde oluşan defleksiyonun zamanla değişim grafiği.....	80
Şekil 4.13. BBR deney sonu ekran görüntüsü.....	80
Şekil 4.14. BBR deneyi uygulanmış deney numuneleri.....	81
Şekil 4.15. Bağlayıcıların viskozite değerleri	83
Şekil 4.16. Bağlayıcıların modifikasyon indeksleri	83
Şekil 4.17. Saf bağlayıcının karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları.....	84
Şekil 4.18. Bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri	85
Şekil 4.19. Marshall metoduna ait temsili örnek grafikler.....	87
Şekil 4.20. Agregaya eklenen bitüm (a), Marshall karıştırıcısı (b)	88
Şekil 4.21. Karışım ve hazır olan Marshall kalıbı (a), Marshall Tokmağı (b).....	89
Şekil 4.22. Numunenin krikoyla çıkarılması (a), kumpasla yüksekliğinin ölçülmesi (b)...	90
Şekil 4.23. Marshall stabilite-akma deney cihazı.....	90
Şekil 4.24. Dp- Bitüm %'si.....	96
Şekil 4.25. Stabilite- Bitüm %'si.....	96
Şekil 4.26. Akma- Bitüm %'si.....	96
Şekil 4.27. Vh- Bitüm %'si.....	97
Şekil 4.28. VMA- Bitüm %'si.....	97
Şekil 4.29. Vf- Bitüm %'si.....	97
Şekil 4.30. Karışımların stabilite değerlerinin katkı miktarıyla değişimi	102
Şekil 4.31. Karışımların akma değerlerinin katkı miktarıyla değişimi	102
Şekil 4.32. Karışımların Marshall oranı değerlerinin katkı miktarıyla değişimi.....	103
Şekil 4.33. Karışımların RMS değerlerinin katkı miktarıyla değişimi.....	104
Şekil 4.34. Vakumlama cihazı (a), dondurucuda bekletilen deney numuneleri (b).....	105
Şekil 4.35. ITS deneyi uygulanan numune (a) ve kırılmış hali (b).....	106
Şekil 4.36. Karışımların ITS değerleri	108
Şekil 4.37. Karışımların ITSR değerleri.....	108
Şekil 4.38. ITSM deney sonu ekran görüntüsü.....	110
Şekil 4.39. Farklı sıcaklıklarda ITSM (MPa) değerleri	113
Şekil 4.40. Yorulma deneyi uygulanan numune.....	114
Şekil 4.41. Karışımların yük tekrarı-deformasyon ilişkisi.....	115
Şekil 4.42. Karışım türü ve kırılmaya neden olan yükleme sayıları	116
Şekil 4.43. Yorulma deneyi uygulanmış numuneler	117
Şekil 4.44. UMATTA deney aleti ve sünme deneyi uygulanan numuneler.....	118
Şekil 4.45. Yük tekrar sayısı-kalıcı deformasyon %'si ilişkisi	119
Şekil 4.46. Akma sayısı (FN)-katkı %'si değişimi.....	119

Şekil 4.47. Karışımların sünme rijitliği (S_m) değerleri.....	120
Şekil 4.48. Darbe sayısı-deformasyon ilişkisi.....	121

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Agrega deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi).....	9
Tablo 2.2. Geleneksel asfalt bağlayıcı test yöntemleri	18
Tablo 2.3. Superpave deneyleri ve kullanım amaçları.....	19
Tablo 2.4. Superpave bağlayıcı şartnamesi (AASHTO MP1).....	20
Tablo 2.5. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri.....	30
Tablo 3.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması.....	50
Tablo 3.2. Bitüm modifikasyon tipleri.....	51
Tablo 3.3. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin muhtemel olumlu etkileri	52
Tablo 4.1. Saf bağlayıcının fiziksel özellikleri	62
Tablo 4.2. Agrega gradasyonu.....	63
Tablo 4.3. Agreganın fiziksel özellikleri.....	63
Tablo 4.4. Elvaloy Ret polimerinin genel özellikleri	64
Tablo 4.5. Bağlayıcıların kütle kaybı sonuçları.....	67
Tablo 4.6. Bağlayıcıların Penetrasyon deney sonuçları.....	69
Tablo 4.7. Bağlayıcıların Yumuşama Noktası deney sonuçları.....	71
Tablo 4.8. Saf ve modifiye bağlayıcıların Penetrasyon indeksi (PI) değerleri.....	73
Tablo 4.9. Bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	75
Tablo 4.10. Orijinal bağlayıcıların DSR deney sonuçları ve performans seviyeleri.....	78
Tablo 4.11. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.....	81
Tablo 4.12. Bağlayıcıların RV deney sonuçları.....	82
Tablo 4.13. Saf ve modifiye bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	85
Tablo 4.14. Marshall dizayn yöntemiyle B 100/150 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları.....	95
Tablo 4.15. Optimum bitüm içeriği tespitinde kullanılan değerler.....	98
Tablo 4.16. Optimum bitüm oranı deney sonuçları.....	98
Tablo 4.17. Optimum bitümde hazırlanan karışım numunelerinin değerleri	99
Tablo 4.18. Karışım performans deneylerinde kullanılan numune sayıları.....	99
Tablo 4.19. Koşullandırılmamış Marshall stabilite-akma deney sonuçları.....	100
Tablo 4.20. Koşullandırılmış Marshall stabilite-akma deney sonuçları.....	101
Tablo 4.21. Karışımların kalıcı Marshall stabilite (RMS) değerleri.....	104
Tablo 4.22. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve oranları (ITSR).....	107
Tablo 4.23. ITSM deney sonuçları (20 °C).....	111
Tablo 4.24. ITSM deney sonuçları (30 °C).....	112
Tablo 4.25. Karışımların yorulma deney sonuçları.....	115
Tablo 4.26. Dinamik sünme deney sonuçları.....	118
Tablo 4.27. Karışımların ortalama deformasyon yüzdeleri.....	120

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

BSK	: Bitümlü sıcak karışım
SBS	: Stiren - Butadiyen - Stiren
PG	: Performans sınıfı
KGM	: Karayolları genel müdürlüğü
PMB	: Polimer modifiye bitüm
DSR	: Dinamik kesme reometresi
RV	: Dönel viskozimetre
RTFOT	: Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kaybı
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği
BBR	: Kiriş eğme reometresi
ITSM	: Dolaylı çekme rijitlik modülü
ITSR	: Dolaylı çekme dayanımı oranı
PI	: Penetrasyon indeksi
SUPERPAVE	: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
SHRP	: Stratejik Karayolu Araştırma Programı
DDT	: Doğrudan çekme deneyi
RMS	: Kalıcı Marshall Stabilitesi
LVDT	: Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
MQ	: Marshall oranı
G _k	: Kaba agreganın özgül ağırlığı
G _i	: İnce agreganın özgül ağırlığı
G _f	: Fillerin özgül ağırlığı
V	: Karışım numunesinin hacmi
D _p	: Karışım numunesinin pratik özgül ağırlığı
W _a	: Agregada içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
M _a	: Karışım içindeki agregada miktarı (gr)
M _b	: Karışım içindeki bağlayıcı miktarı (gr)
W _b	: Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi
G _b	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
D _T	: Karışımın teorik özgül ağırlığı
V _h	: Karışımdaki boşluk yüzdesi
V _b	: Karışımdaki bağlayıcı yüzdesi
V _a	: Karışımdaki agregada yüzdesi
VMA	: Agregalar arası boşluk oranı
V _f	: VMA'nın bağlayıcıyla doluluk oranı
S _m	: Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ITS	: Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme dayanımı
G*	: Bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü
δ	: Bitümlü bağlayıcının faz açısı

1. GİRİŞ

Canlıların veya eşyaların bir yerden başka bir yere nakledilmesine ulaştırma denilmektedir. Bir ülkenin kalkınmasında ve ilerlemesinde önemli bir yere sahip olan ulaştırma sistemleri karayolu, demiryolu, havayolu, deniz ulaşımı ve boru hatları olmak üzere beş dala ayrılmaktadır. Ülkemizde yük ve yolcu taşımada en çok kullanılan ulaşım türü karayoludur [1].

Ülkemizdeki karayolları, üstyapısında kullanılan malzemelerin kolay temin edilebilmesi ve yolun kısa bir süre sonra trafiğe açılabilmesi sebebiyle gelişmiş ülkelerde olduğu gibi esnek kaplamalı olarak inşa edilmektedir. Araç tekerleklerinin doğrudan temas ettiği dolayısıyla en büyük gerilmelere maruz kalan, güvenli ve konforlu bir sürüşten birinci dereceden sorumlu olan ve karayolu üstyapısının en pahalı kısmını oluşturan esnek kaplama tabakaları; sathi kaplama, road-mix, bitümlü sıcak karışım gibi farklı şekillerde inşa edilmektedir [2]. Kaplama tabakası, üzerine etki eden yüklere karşı bozulmadan direnç gösterebilecek ve yükü alt tabakalara iletebilecek, suların altyapıya sızmasına engel teşkil edecek, bölgenin olumsuz iklim koşullarında kararlılığını yitirmeyecek, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş temin edecek nitelikte olmalıdır.

Orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak, üst yapıdaki diğer tabakaları çevre koşullarının olumsuz etkilerinden korumak amacıyla yapılan bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bitüm ve agreganın ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, karışım içerisine dağılmış halde bulunan agrega, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Malzemeye bağlı olarak bitümlü sıcak karışımların özellikleri; farklı bağlayıcı-agrega kombinasyonlarının, agrega gradasyonlarının ve modifikasyon tekniklerinin kullanılmasına göre farklılık göstermektedir [3].

Daha konforlu ve dayanıklı olması sebebiyle özellikle gelişmiş ülkeler tarafından yaygın olarak kullanılan BSK'lar, son yıllarda ülkemiz ekonomisindeki gelişmelere bağlı olarak karayollarımızda daha sık kullanılmaya başlanmıştır [4].

Yüksek maliyeti nedeniyle BSK'yı oluşturan bitüm ve agreganın özellikleri, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu karışımlarda ağırlıkça, agrega %94-96, bitüm %4-6 oranlarında yer

almasına rağmen, kaplamanın maliyeti ve performansı üzerinde bağlayıcının büyük önemi bulunmaktadır. Viskoelastik davranış gösteren ve termoplastik bir malzeme olan bitüm, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. Viskoelastik özelliğinden dolayı bitümlü malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirler. Termoplastik özellik nedeniyle malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Başta kırılma ve kalıcı deformasyon olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımlarında viskoelastik ve termoplastik özellik göstermesine neden olmaktadır [2]. Bu reolojik özelliğinden dolayı bitümün yapısal ve fiziksel özellikleri ile bağlayıcı olarak içerisinde önemli bir rol oynadığı bitümlü karışımın davranışları arasındaki ilişkinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Esnek üstyapı kaplamalarında, artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını arttırmak amacıyla birçok ülkede, bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya modifiye karışımlar elde edilmektedir [5,6]. Bitüm modifikasyonunda genellikle polimerler, polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri ile doğal katkı maddeleri (göl asfaltları, kaya asfaltları, gilsonitler) kullanılmaktadır. Ancak bitüm modifikasyonunda en çok polimer türü katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Polimerler; elastomerler ve plastomerler olmak üzere başlıca iki ana gruba ayrılabilir. Ancak bazı sınıflandırmalarda fiberler ve kaplayıcılar da polimer sınıflandırmasına dahil edilir.

Bu tez çalışmasında Elvaloy Ret polimeri kullanılarak, modifiye bitümlü bağlayıcılar ve modifiye bitümlü karışımlar hazırlanmıştır.

Elvaloy Ret polimer katkı türünün BSK'ların özelliklerine etkisinin Marshall dizayn yöntemi çerçevesinde araştırıldığı bu çalışmada, Elvaloy Ret modifikasyonu ile kaplamalarda; sıcak iklim koşullarının hüküm sürdüğü yerlerde çok ağır trafik yüklerinin altında tekerlek izinde oturmaya karşı yeterli direnç sağlamak, soğuk hava koşullarında termal çatlak oluşumu riskini azaltmak, iyi bir adezyon ve kohezyon temin ederek mekanik özellikleri iyileştirmek, su tesirlerine karşı direnci arttırmak

ve üstün bir performans sağlayacak daha düşük kalınlıkta tabakaların inşa edilmesi amaçlanmıştır.

Kullanılan BSK'lar, agrega ve bitümlü bağlayıcının belirli oranlarda bir araya gelmesi ile oluşan kompozit malzemelerdir. Bu özelliği dolayısıyla kaplama performansı ile doğrudan ilgisi bulunan ve BSK'yı teşkil eden agrega ve bitümlü bağlayıcının ve bunlardan oluşan BSK'nın özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla çalışmanın ikinci bölümünde; BSK'yı oluşturan malzemeler hakkında gerekli bilgiler verilerek, tasarlanan bir kaplamadan beklenen performans özellikleri, kaplamada oluşmuş veya oluşması muhtemel bozulmalar, kaplamayı teşkil etmede kullanılan tasarım yöntemleri ve bu tasarım yöntemleri ile teşkil edilmiş kaplamaların performans tayini için kullanılan karışım deney yöntemleri hakkında bilgiler verilerek bir bütünlük halinde BSK'ların önemi vurgulanmıştır. BSK'yı oluşturan agregalara uygulanan deneyler ve bitümlü bağlayıcının yaşlandırılması ile bitümlü bağlayıcılara uygulanan geleneksel test yöntemleri ve performans deneyleri de bu bölümde verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleri hakkında genel bilgiler verilerek, kullanılan başlıca katkı türleri ve olumlu etkileri verilmiştir. Daha sonra çalışmanın esas konusunu teşkil eden kimyasal reaktör Elvaloy Ret terpolimerinin özellikleri verilmiş ve Elvaloy Ret ile modifiye edilmiş bitüm ve bitümlü karışımlar hakkında yapılmış olan araştırmalar incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; deneysel çalışmalar altı alt başlık altında verilmiştir. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler ile karışım da kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri ve seçilen gradasyonu hakkında bilgiler ilk iki başlık altında verilmiştir. Katkı malzemesi olarak Elvaloy Ret kullanılarak, modifiye bitümlü bağlayıcılar hazırlanması detaylı olarak üçüncü alt başlıkta izah edilmiştir. Bunlara geleneksel test yöntemleri ve performans deneyleri uygulanmış, sonuçlar gösterilmiş ve yorumlanmıştır. Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılar yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuş ve kütle kayıpları belirlenmiştir. Beşinci alt başlıkta; Marshall dizayn yöntemi çerçevesinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar anlatılmış, optimum bitüm oranları bulunmuş ve karışım numunelerinin hazırlanması detaylı olarak anlatılmıştır. Son olarak dizayn bağlayıcı içeriğinde saf ve modifiye bitümlü

bağlayıcılarla hazırlanmış olan saf ve modifiye bitümlü karışım numuneleri üzerinde uygulanan performans deneyleri sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde; dördüncü bölümde yapılan tüm deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler genel olarak değerlendirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) KAPLAMALAR

Karayollarında oluşturulan üstyapılar kullanılan bağlayıcı malzemenin tipine bağlı olarak; rijit kaplamalar ve esnek kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılır. Rijit yol üstyapılarında bağlayıcı malzeme olarak portlant çimentosu, esnek yol kaplamalarda ise asfalt çimentosu kullanılmaktadır.

Rijit kaplamalar, trafik hacminin fazla olduğu ve taşıt trafiğinin ağır olduğu karayollarında ve havaalanlarında gerekli sürüş konforu ve emniyetini sağlamak amacıyla yapılan yüksek standartlı rijit üstyapılardır. Rijit (beton) kaplamalar, yeterli mukavemete sahip zeminler üzerine belirli bir kalınlıkta serilen granüler alt temel tabakası ile donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelir [7].

Esnek kaplamalar, taşıtlar için gerekli performansa (sürüş konforu ve emniyeti) ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterince stabiliteye sahip olacak şekilde farklı özelliklere sahip tabakalardan imal edilen çok tabakalı esnek bir yapıdır. Esnek kaplamaları genel olarak düşük standartlı kaplamalar ve yüksek standartlı kaplamalar olarak iki kısma ayırabiliriz. Düşük standartlı kaplamalar da sathi kaplamalar, makadam temeller (veya yollar) ve koruyucu satıh tabakalar olarak sınıflandırılır. Yüksek standartlı kaplamalar, bitümlü sıcak karışım kaplamalardır [7].

Ülkemizde gerek kent içi, gerekse kent dışı yollardaki trafik hacmi henüz rijit kaplamaların yapımını zorunlu kılmadığından dolayı esnek kaplamalar hala önemini korumaktadır. Esnek kaplamalar, sıkıştırılmış zemin üzerine alt temel, temel ve kaplama tabakası olarak inşa edilmektedir.

Yol kaplamasının yapılacağı zeminin, üzerine gelecek yükleri sorunsuz bir şekilde taşıyabilmesi için yeterince mukavemetli olmalı ve bunu sağlamak için de bitkisel toprak alınıp, yerine seçme temel malzemesi konularak gerekli miktarda sıkıştırma yapılmalıdır. Kaplamanın oturacağı zemin belli bir taşıma gücüne sahip olmalı ve zeminin hacim değiştirmesi (oturma, şişme, kabarma vb.) kaplamayı olumsuz yönde etkilememelidir [7].

Zeminlerde oluşabilecek şişme-büzülme ve don kabarması gibi hacimsel değişimleri önlemek, yol kaplamasının altında gerekli drenajı sağlamak ve kaplamanın taşıma gücünü arttırmak gibi sebeplerden dolayı yol kaplamalarının en

altına bir alttemel tabakası imal edilir. Alttemel tabakası üstteki tabakalara nazaran daha az gerilmeye maruz kalacağından daha düşük kaliteli fakat dren kabiliyeti yüksek ve yeterince stabil olan granüler malzemelerden yapılır. Temel tabakası, kaplamaya ve banketlere temel teşkil etmek üzere granüler malzemelerden bağlayıcılı ve bağlayıcısız olmak üzere farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde imal edilir. Temel tabakası kaplamalar için gerekli stabiliteyi ve yeterli drenajı sağlamakla yükümlüdür. Eğer temel tabakasının yüksek stabiliteli olması gerekiyorsa bitüm veya çimento ile stabilize edilmelidir [7].

Esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyet sağlaması, ayrıca üzerine gelen yükleri alt tabakalara iletmesi amacıyla yapılırlar. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde bitümlü sıcak karışımlar ile imal edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agregası, ince agregası ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerine uygun olarak uygun bir bitümlü bağlayıcı oranı ile bir plentte belirli sıcaklıkta homojen olarak karıştırılması ile elde edilir ve yola taşındıktan sonra belirli sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşaatı gerçekleştirilir. Agregası-asfalt karışımlarının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlaması gerekir [7].

Esnek üstyapının performansını doğrudan etkilemesi sebebiyle yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından bağlayıcı ve agregaların özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agregası; doğal, yapay veya her iki cins mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış ve/veya kırılmamış tanelerin bir yığınıdır. Asfalt karışımların performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, bitümlü sıcak karışımlarda en önemli ikinci malzemedir. Karışımın ağırlıkça %90 ile %95'ini, hacimce %75 ile %85'ini oluşturan mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde

önemli rol oynarlar. Mineral agreg a malzemesi, kaba agreg a, ince agreg a ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karış tırılması ile elde edilmektedir.

2.1.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla; mineralojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, özgül ağırlık, yüzey alanı ve boşluk oranı sınıflandırmaları yapılmakta ve bu sınıflandırmalara göre agregaların uygun olup olmadıkları belirlenmektedir.

2.1.1.1. Mineralojik Sınıflandırma

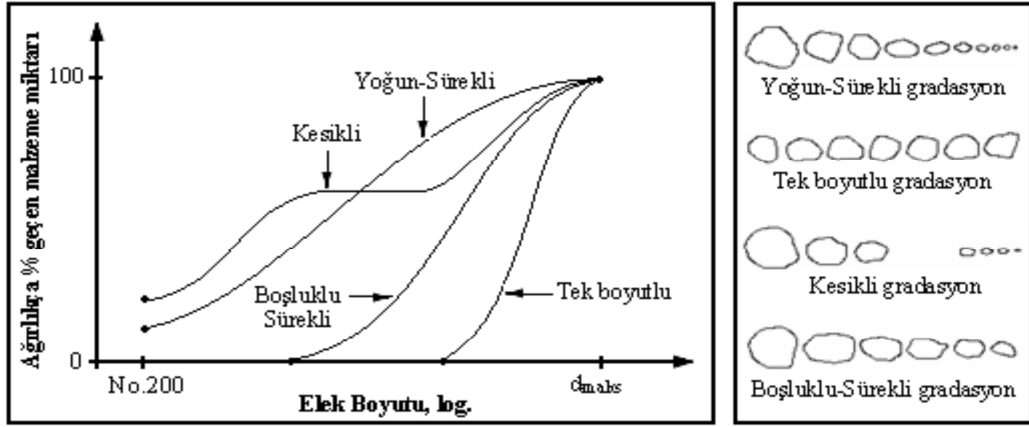
Agregalar genel olarak; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlardan elde edilmektedir. Dere malzemeleri, sahip oldukları olumsuz özelliklerden dolayı alttemel hariç yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yapay taşlar ise genellikle yüksek fırın cüruflarından elde edilmektedir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agreg a, kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agreg alardır [8].

2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması

Agregalar boyut bakımından; kaba, ince ve filler olarak sınıflandırılmaktadır. No:4 (4,75 mm) eleğin üzerinde kalan kaba agreg a, No:4 elekten geçip No:200 (0,075 mm) eleğin üzerinde kalan ince agreg a ve No:200 elekten geçen malzeme ise filler olarak isimlendirilir. Maksimum dane boyutu, malzemenin tamamının geçtiği minimum elek açıklığı olarak tanımlanmaktadır. Kaba agreg a karışımının ana iskeletini oluştururken ince agreg a ve filler bu iskeletin arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmesini sağlamaktadır [8].

2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması

Gradasyon, agreg a harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Gradasyonundaki maksimum dane boyutu art tı kça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşmakta, segregasyon artmakta, yoğunluk ve stabilite artarken bağlayıcı ihtiyacı azalmaktadır. Agreg a gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı [4]

Kesikli gradasyon, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden boşluk miktarı fazladır. Taş mastik asfalt yol kaplamalarında genel olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak aynı boyuta sahip agregalardan oluşan tek boyutlu gradasyon ise sathi kaplama gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince agrega ihtiva etmediğinden agrega karışımının boşluk oranı oldukça yüksektir. Bu tip, filtre ve drenaj malzemesi olarak kullanılabilir. Yoğun-sürekli gradasyon, maksimum yoğunluk ve minimum boşluk ihtiva eder. Bu tip, karışımın yoğunluğunu artırmanın yanında geçirimsizliğin azalmasını sağlamaktadır. Yoğun-sürekli gradasyon, bitümlü sıcak karışımlarda tercih edilen gradasyon sınıfıdır [4].

2.1.1.4. Biçim ve Yüzey Yapısı

Agrega danelerinin biçimleri, karışımların; sıkışma direncine, işlenebilirliğine, yoğunluğuna, stabilitesine, içsel kenetlenmesine ve kayma mukavemetine etki etmektedir. Agregalar biçim bakımından; yuvarlak, köşeli, düzensiz, yassı, ince-uzun ve yassı-ince-uzun olarak sınıflandırılmaktadırlar. Yuvarlak biçimli agregaların işlenebilirlik özelliği köşeli agregalara göre daha yüksek olmasına karşın stabilite bakımından temas noktası sayısı fazla olduğundan köşeli agregalar daha üstün özellik göstermektedir [8].

Agregaların yüzey yapısı, danelerin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade etmektedir. Agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça işlenebilirlik azalmakta fakat içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti ve bitüm ile adezyon kuvveti

artmaktadır. Bu sebepten dolayı cilalı agregaların esnek yol üstyapılarında kullanımı uygun değildir [8].

2.1.1.5. Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk

Agrega danelerinin, asfaltın emilmesine olanak sağlayacak oranda poroziteye sahip olması gerekmektedir. Yeterli poroziteye sahip agregalar, bağlayıcı ile güçlü bir adezyon sağlayarak stabilitenin artmasına ve asfalt film tabakasında soyulmanın azalmasına olanak sağlamaktadır. Porozitenin fazla olması ise yoğunluğun ve stabilitenin düşük olmasına ayrıca asfalt ihtiyacının artması sebebiyle sıcak havalarda terleme meydana gelmesine neden olmaktadır [8].

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ve agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı karışımların bütün özelliklerine doğrudan etki eden faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi; gradasyon, maksimum dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır [8].

2.1.2. Agregalara Uygulanan Deneyler

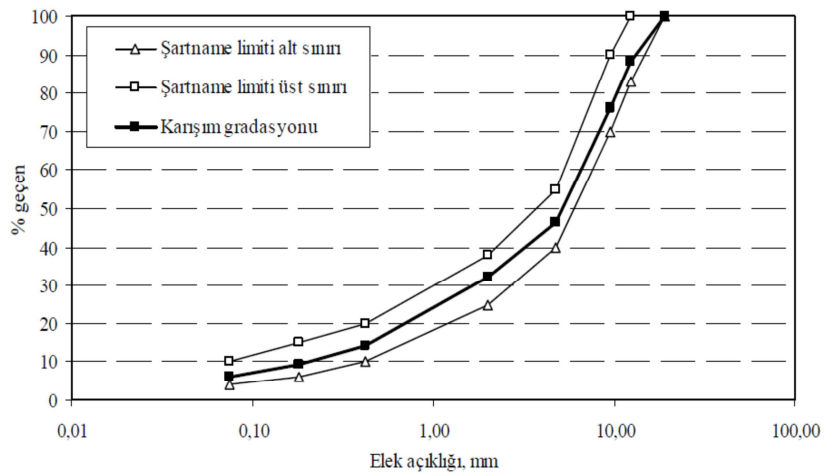
Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların uygunluğunu belirlemek amacıyla dane boyutu (elek analizi), Los Angeles (aşınma), hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma, su tesirine karşı dayanıklılık, özgül ağırlık ve yassılık indeksi tayini deneyleri yapılmaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Agrega deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi), [12]

AGREGA DENEYLERİ	AŞINMA	BİNDER	BİTÜMLÜ TEMEL	SATHİ KAPLAMA	TAŞ MASTİK ASFALT
Aşınma, maks %	30	35	35	30	25
Sağlamlık, (MgSO ₄) maks %	16	18	18	18	14
Soyulma Mukavemeti, min %	50	50	50	50	60
Yapışma, maks %	-	-	-	12	-
Cilalanma Değeri, min	50	-	-	50	50
Kırılmışlık, min %	100	100	100	80	-
Yassılık İndeksi, maks %	30	35	35	25	25
Su Absorbsiyonu, maks %	2	2,5	2,5	2,5	2
Metilen Mavisi, maks %	1,5	1,5	2	2	1,5

2.1.2.1. Dane Boyutu (Elek Analizi) Deneyi (ASTM C131- TS 1900)

Agrega danelerinin karışım içerisindeki dağılımını tespit etmek amacı ile elek analizi yapılır. Elek analizi, numuneleri elekler üzerinde en az 2 dakika sarsmak ve her elek üzerinde kalan agregayı tartmak suretiyle yapılmaktadır. Elekten geçen miktar tartılıp numunenin bütün ağırlığına bölünerek karışımındaki yüzdesi tespit edilmektedir. Her bir elek üzerinden geçen malzeme yüzdelere göre agreganın karışımının granülometri eğrisi çizilmektedir [10]. Şekil 2.2’de bir agreganın karışımının granülometri eğrisi gösterilmektedir [11].



Şekil 2.2 Agreganın granülometri eğrisi

2.1.2.2. Aşınma (Los Angeles) Deneyi (AASHTO T96, TS EN 1097-2)

Agregaların sağlamlığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde kullanılacak agreganın maksimum dane boyutuna bağlı olarak 1250, 2500 veya 5000 gr. malzeme ve yeterli miktarda bilye, çelik silindir tamburun içerisine bırakılır. Kullanılan malzeme miktarına göre tambur yatay eksen etrafında 500 veya 1000 devir döndürülür. Tamburdan çıkarılan malzeme 1,7 mm. den daha büyük açıklıklı bir elekten eğer. Daha sonra 1,7 mm. açıklıklı elekten eğer. Elek üzerinde kalan malzeme yıkanır ve kurutulur. Kayıp malzeme miktarı ilk ağırlığa bölünerek aşınma oranı tespit edilir [10]. Bitümlü sıcak karışımlarda aşınma tabakasında kullanılacak agregaların aşınma oranı %30’u aşmamalıdır [12].

2.1.2.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1)

Agregaların hava etkileriyle donarak ufalanmasına karşı dirençlerinin tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Etüvde önceden kurutulan numune, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) eriyiği içerisine daldırılıp oda sıcaklığında 16-18 saat bekletilir. Bu süre sonunda çıkarılan numune 15 dakika süzölmeye bırakılır ve 110 °C sıcaklıkta sabit sıcaklığa kadar kurutulur. Bu işlem 5 kez tekrarlanır. 5. devre sonunda etüvden çıkarılan malzeme soğutulur, yıkanır ve kurutulur. Eleme işlemi yapılarak donma kaybı tespit edilir [10].

2.1.2.4. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)

Agregaların, taşıt lastikleriyle sürtünmesi sonucunda aşınarak cilalanması oranının tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Cilalanma makinesinin alt tekerleğine 14 adet numune sabitlenir. Üstteki teker 6 saat süre ile bu agregalara temas eder. Tekerlek ile agregalar arasına ince aşındırıcı maddeler eklenir. Deney sonucunda elde edilen cilalanma miktarı, yoğun trafikli yolların birkaç ayda, az yoğunluklu yolların ise bir kaç yılda ulaşabileceği aşınmaya tekabül etmektedir. Deney sonucunda ölçülen kayma direnci, ilk kayma direncine oranlanarak cilalanma katsayısı tespit edilir [10]. BSK kaplamalarda kullanılacak agregaların aşınma tabakasında minimum cilalanma katsayısının %50 olması istenmektedir [12].

2.1.2.5. Su Tesirine Karşı Dayanıklılık (Soyulma) Deneyi (ASTM D 1664)

Soyulma; bağlayıcının, suyun ve trafiğin birlikte etkisi sonucunda agreganın üzerinden ayrılmasıdır. Karayolları genel müdürlüğü teknik şartnamesine uygun olarak yapılan deneyde agregaların soyulmaya karşı dayanımını belirlemek amacıyla belirli miktarda malzeme alınarak yıkanır ve etüvde kurutulur. Bu malzemeye bağlayıcıya eklenir ve tamamen kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım, 24 saat 60 °C etüvde bekletilir. Daha sonra karışım ısıtılarak daha geniş bir kaba aktarılır ve yine 60 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilir. Deney sonunda soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye oranı soyulmaya karşı dayanımı göstermektedir [10]. Bu oran aşınma tabakasında minimum %50 olmalıdır [12].

2.1.2.6. Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyi (TS EN 1097-6)

Kaba agreganın özgül ağırlığını bulmak amacıyla gradasyona uygun olarak ayarlanmış 1500 gr. malzeme yıkanıp üzerindeki tozlardan arındırılır. Su içinde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılır, danelerin üzerinde gözle görülebilir su kalmayacak şekilde kurulanır ve tartılarak doymuş kuru yüzey ağırlığı bulunur (W_1). Daha sonra malzemenin sudaki ağırlığı alınır (W_2). Malzeme tekrar etüvde kurutulduktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulur ve tartılarak malzemenin havadaki ağırlığı tespit edilir (W_3). Eşitlik (2.1) ve (2.2)'deki formüller yardımıyla kaba agreganın özgül ağırlığı ve su emme yüzdesi (m_k) tespit edilir [10].

$$G_k = \frac{W_3}{W_1 - W_2} \quad (2.1)$$

$$m_k = \frac{W_1 - W_3}{W_3} \times 100 \quad (2.2)$$

İnce agreganın özgül ağırlığını bulmak için gradasyona göre ayarlanmış 300 gr. malzeme alınır, sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar etüvde kurutulur ve tartılır (W_1). Numune 24 saat suda bekletilir. Sudan çıkarılan numune, süzülür ve kohezyonunu kaybedince kadar kurutulup tartılır (W_2). Piknometreye belirli bir seviyeye kadar saf su doldurulur ve tartılır (W_3). Piknometre içindeki su boşaltılır, yerine malzeme koyulur ve aynı seviyeye kadar saf su ilave edilip tartılır (W_4). Ağırlıklar belirlendikten sonra eşitlik (2.3) ve (2.4)'ten ince agreganın özgül ağırlığı ve su emme yüzdesi (m_i) saptanır [10].

$$G_i = \frac{W_1}{W_2 + W_3 - W_4} \quad (2.3)$$

$$m_i = \frac{300 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Fillerin özgül ağırlığının tayininde Le Chatelier kabından faydalanılır. Belirli bir miktar malzeme etüvde sabit sıcaklığa kadar kurutulur ve nem kapmayacak şekilde bir kabın içinde soğutulur. Filler malzemesi suya ilave edildiğinde tam olarak çökme sağlayamadığından deney, özgül ağırlığı daha düşük olan gazyağı ile

yapılmaktadır. Le Chatelier şişesi belirli bir noktaya kadar gazyağı ile doldurulur. Soğutulan filler malzemesinden 60 gr. alınır (M) ve malzeme kaybı olmayacak şekilde şişeye doldurulur. Şişede işaretli bölmelerden yararlanılarak hacim değişikliği saptanır (V) ve eşitlik (2.5) ile fillerin özgül ağırlığı (G_f) tayin edilir [10].

$$G_f = \frac{M}{V} \quad (2.5)$$

2.1.2.7. Yassılık ve İnce-Uzunluk İndekslerinin Tayini Deneyi (BS 812)

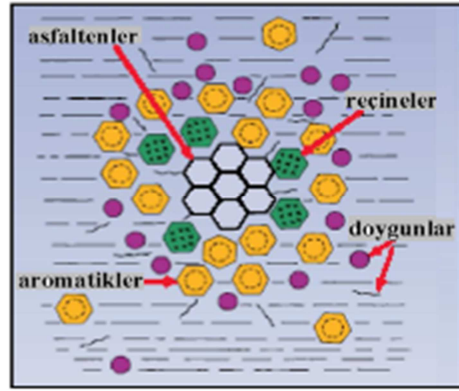
Yassı ve ince uzun daneler, yük altında daha kolay kırılarak bitümlü sıcak karışımın daha düşük dayanım göstermesine ve gerçek gradasyonun bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle agregada danelerinin şekil olarak yassı ve ince uzun olmaması veya sınırlı miktarda olması gerekmektedir. Bunun tespiti için yassılık indeksi deney aparatı kullanılmaktadır. En büyük boyutunun en küçük boyutuna oranı 5'ten büyük olan agregalar yassı ve ince uzun daneler olarak kabul edilmektedir [8].

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Bitümlü sıcak karışımlar, agregada ve bitümlü bağlayıcı kullanılarak elde edilmektedir. Bitümlü bağlayıcı, karışımların ağırlıkça en fazla %5-7'sini oluştursa da karışımların özellikleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bitümlü bağlayıcı, agregada danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmalarını önlemekte, sağladıkları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu arttırmakta, kohezyonu sayesinde karışım stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcı, doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesiyle elde edilmektedir [8].

Asfalt, rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, ana maddesi bitüm olan, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilmektedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri asfalt kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılabilir [4]. Asfalt, organik bir madde olduğu için kimyasal yapıları farklılık göstermektedir. Genel olarak asfaltlar; %82-88 karbon, %8-11 hidrojen, %0-1 nitrojen, %1-6 sülfür, %0-1.5 oksijen ve çok az miktarda

metal bileşenlerden meydana gelmektedir. Asfaltın kimyasal yapısı karmaşık olup az bilinmektedir. Ancak orijinal kaynağı olan ham petrolün kimyasal özelliklerine bağlıdır. Genel olarak asfaltın yapısına ait bir görüntü verilmiştir (Şekil 2.3) .



Şekil 2.3 Asfaltın kimyasal yapısı [4]

Bitüm, “doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunların sıvı, yarı katı ve katı olabilen, metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde” olarak tanımlanır. Bitümlü sıcak karışımlarda bağlayıcı görevi görür. Doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımıdır. Petrol kökenli bir asfalttır [13].

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfaltlar ve katranlar olarak iki kısma ayrılırlar. Asfaltlar da doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar diye ikiye ayrılırlar. Doğal asfaltlar, mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise, ham petrolün arıtılmasından elde edilir. Katran, başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Arıtıldıktan sonra kullanılır [13].

Normal şartlar altında bitümler, penetrasyon veya viskozite değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Ancak genellikle bitümler penetrasyonlara göre sınıflandırılır. Amerika’da bitümle, son yıllarda, Superpave sistemde performans derecesine göre sınıflandırılmaktadır. Değişik penetrasyon dereceleri, petrolün arıtılması sırasında işletmelerde sağlanır [13].

Asfalt çimentolarının özgül ağırlıkları elde edildikleri petrole bağlı olarak 25 °C’de 1-1,1 arasında değişiklik göstermektedir. Yüksek penetrasyonlu asfaltların özgül ağırlıkları genellikle düşük penetrasyonlu asfaltlara göre daha düşüktür [10,12].

Bitümün hacimsel genleşmesi agregadan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Asfaltın hacimsel genleşme katsayısı yaklaşık $6,1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 'dir [10,12].

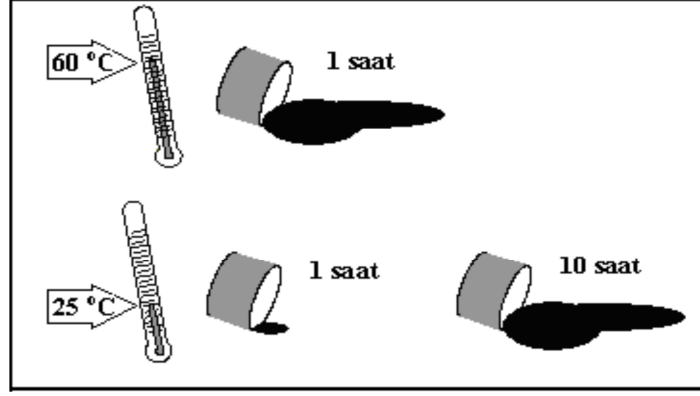
Asfalt çimentolarının ısı iletkenliği agregaya göre daha düşük olduğundan daha geç ısınmakta ve soğumaktadır. Bu özellikten ötürü BSK'lar bağlayıcıya göre daha çabuk soğumakta bu da asfalt karışım içerisinde farklı büzülmelemlerden kaynaklanan ilave gerilmelere sebep olmaktadır. Ayrıca asfalt çimentosunun ısıyı absorbe edebilme özelliğinden dolayı kaplamanın altı ve üstü arasında sıcaklık farkı meydana gelmekte bu da farklı genleşmelerden kaynaklanan ilave gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır [10,12].

Asfalt çimentolarının çekme mukavemetleri ısıya ve yükleme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda asfalt çimentolarının rijitliği düşük olduğu için çekme gerilmeleri altında kopmalar meydana gelmezken düşük sıcaklıklarda rijitlik fazla olduğundan bu tip deformasyonlar görülebilmektedir [8].

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi, agrega daneleri arasındaki asfalt çimentosunun bağ kuvvetine bağlıdır. Bu bağ kuvveti ise agrega danelerini saran bağlayıcı filmin agregaya yapışma yeteneğine yani asfalt çimentosunun adezyonuna bağlıdır. Asfalt çimentosunun agrega ile iyi bir adezyon sağlayabilmesi için viskozluğunun mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Bunun için kıvamı yüksek olan bağlayıcıların uygun sıcaklığa kadar ısıtılıp akışkanlık kazanması sağlanmalıdır. Agregaların yüzey pürüzlülüğü, porozitesi ve su emme özelliği arttıkça bağlayıcının adezyon özelliği artmaktadır [8].

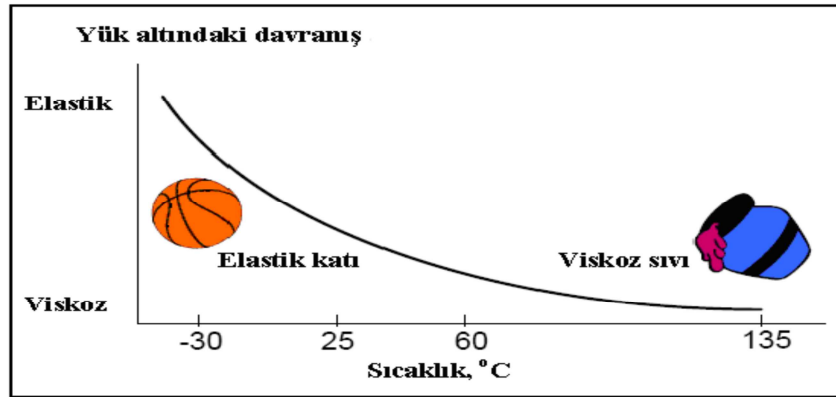
2.2.1. Bitümün Reolojik Davranışı

Esnek yol kaplamasının ana malzemelerinden biri olan bitüm, mühendislik davranışı bakımından viskoelastik davranış gösteren termoplastik bir malzeme olup, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. Bitümün davranışı sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olduğu için, aynı yük farklı sürelerde uygulandığında asfalt farklı özellikler sergileyecektir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bitümün 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış miktarı ile 25 °C'de 10 saatte gösterdiği akış miktarı aynı olmaktadır. Bu davranış, sıcaklık ve yükleme süresinin bitüm üzerindeki etkilerinin benzer olduğunu ifade eder. Yani, bitümün yüksek sıcaklıkta ve kısa sürede yaptığı davranış, düşük sıcaklıkta ve daha uzun sürede yaptığı davranış ile eşdeğerdir.



Şekil 2.4 Bitümün farklı sıcaklık ve zamanlara göre davranışı [4].

Bu tür malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Şekil 2.5). Bitümün bu reolojik özelliği asfalt karışımların da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [4].



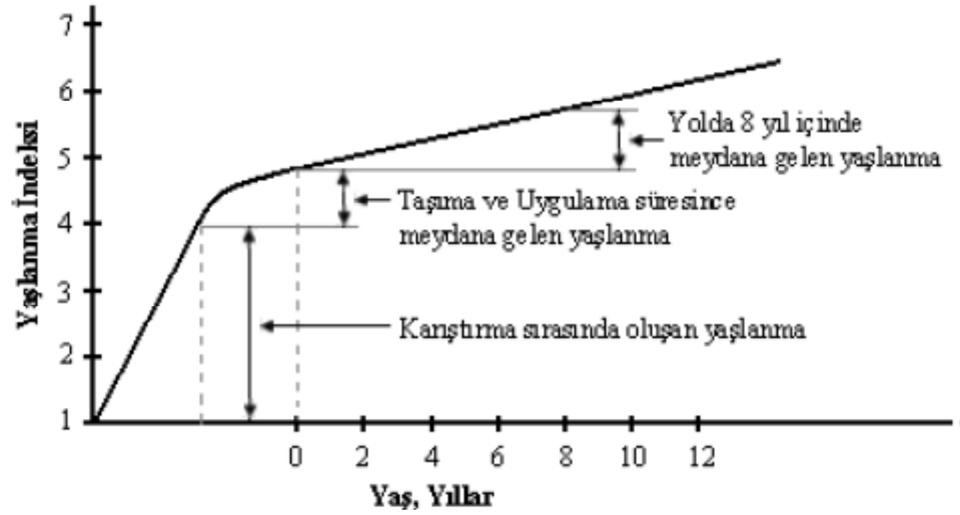
Şekil 2.5 Bitümün sıcaklık hassasiyeti [4].

Çöl iklimi gibi sıcak koşullarda ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda, asfalt çimentosu viskoz davranır. Bu koşullarda sıcak asfalt karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, asfalt çimentosu elastik bir katı gibi davranış gösterse de; taşıma kapasitesinden daha fazla yüklendiğinde kırılabilir ve çatlayabilir. Buna, düşük sıcaklıktan ötürü kaplama yüzeyinin büzülme

alışmasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler neden olur. İklim ve evre şartları genellikle aşırı sıcak ile aşırı soğuk arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde asfalt bağlayıcı, hem kıvamlı sıvı ve hem de elastik katı özelliklerini sergiler. Bu davranış aralığı nedeniyle bitüm, üstyapı kaplamalarında kullanmak için mükemmel bir yapışkan malzeme, ancak bir o kadar da anlaşılması ve açıklanması zor bir malzemedir [4].

Bitümlü kaplama tabakalarının hizmet ömrünü bozulmadan tamamlamaları için depolama, üretim ve hizmet ömrü boyunca bitümün aşırı derecede sertleşmemesi gerekir. Organik bir malzeme olan bitüm, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışıklardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek şekilde sertleşme eğilimi göstermektedir. Birçok organik maddede olduğu gibi bitüm de hava ile temas ettiğinde yavaşça oksidasyona uğrar. Bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha az esnek yapan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağlıdır. 100 °C'nin üzerindeki her 10 °C'lik artış oksitlenme veya oksidasyon oranını iki katına çıkarmaktadır. En önemli yaşlanma nedeni olan oksidasyon, asfalt çimentosunun daha kırılgan olmasını sağlar ve yaşlanma sertleşmesi sürecini başlatır. Bu sertleşme nedeniyle eski asfalt kaplamalar çatlamaya karşı daha hassas olurlar. Asfaltın yaşlanması kısa ve uzun süreli yaşlanma olarak gerçekleşmektedir. Kısa süreli yaşlanma olarak kabul edilen süreçte (karıştırma, depolama, taşıma ve uygulama süresinde yaşlanma) meydana gelen yaşlanma, toplam yaşlanmanın yaklaşık %70 düzeyindedir ve bu süreçte yaşlanmış asfaltın viskozitesi orijinal viskozitesine göre yaklaşık beş kat yüksektir. Ancak, uzun süreli yaşlanma olarak adlandırılan süreçte, 8 yıllık hizmet süresinden sonra oluşan yaşlanma, toplam yaşlanmanın %30'u kadardır [4].

Asfaltın karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresindeki yaşlanması Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 Asfaltın yaşlanma süreci [4]

2.2.2. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Asfalt bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bağlayıcı üzerinde çeşitli geleneksel deneyler yapılmaktadır. Uygulanan geleneksel bağlayıcı test yöntemleri; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, Fraas kırılma noktası ve özgül ağırlık deneyleridir. Bu yöntemler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Geleneksel asfalt bağlayıcı test yöntemleri [4]

Test Tipi	Standart Koşullar	Referans
Penetrasyon, 0.1 mm	25 °C, 5sn, 100gr.	ASTM D5-AASHTO T49 EN 1426- TS 118
Yumuşama Noktası, °C	-	ASTM D36- EN 1427- TS 120
Frass Kırılma Noktası, °C	-	IP 80- EN 12593
Düktilite, cm	25 °C, 5cm/dak	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Parlama Noktası, °C	-	ASTM D92- AASHTO T48 TS 123
Çözünürlük	-	ASTM D2042- AASHTO T44 TS 1090
Kinematik Viskozite, mm ² /sn	135 °C	ASTM D2170- AASHTO T201 EN 12595
Dinamik Viskozite, Pas	60 °C	ASTM D2171- AASHTO T202
Isıtma Kaybı, TFOT, ağırlıkça %	163 °C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma Kaybı, RTFOT, ağırlıkça %	163 °C, 75 dak	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık	25 °C	TS 1087- ASTM D70

Geleneksel test yöntemleriyle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması nedeniyle hem saf bitüm hem de bitümlü bağlayıcılar üzerinde

doğrudan arazi şartlarındaki performanslarıyla ilgili fiziksel özelliklerini ölçen yeni test yöntemleri geliştirilerek Superpave bağlayıcı şartnamesi oluşturulmuştur. Superpave yöntemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını azaltarak bağlayıcının performansını en üst düzeye çıkarmak ve ölçmek için tasarlanmıştır. Bu şartnamenin en önemli özelliği; deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgede maruz kalacağı sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesidir (Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Superpave deneyleri ve kullanım amaçları [4]

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Dinamik 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 (DDT)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar üzerinde Superpave yöntemleri uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmasını temsil etmesi amacıyla Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) deneyi ve uzun dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV) deneyi yapılmaktadır.

Bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla Dönel Viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımı belirlemek için Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme deneyi (DDT) ve yüksek sıcaklık dayanımlarını belirlemek amacıyla da Dinamik Kesme (Kayma) Reometresi (DSR) deneyleri uygulanmaktadır.

Aşağıda Tablo 2.4'te gösterilen Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, saf ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların her ikisine de uygulanmaktadır.

Tablo 2.4. Superpave bağlayıcı şartnamesi (AASHTO MP1) [4]

PERFORMANS SINIFI	PG 58-								PG 70-							
	16	22	28	34	40	40	10	16	22	28	34	40				
	< 58								< 70							
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40				
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	ORJİNAL BAĞLAYICI															
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230															
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	58				70											
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	58				70											
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	31	34	28	25	22	19					
Fiziksel Sertleşme,	Rapor															
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30					
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30					

Superpave yönteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılır ve PG simgesi ile gösterilir. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 58-22 gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilirler. Burada ilk sayı olan 58, “yüksek sıcaklık derecesi” olarak adlandırılır ve bu bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini hizmet etmesi beklenen iklim koşullarındaki en yüksek kaplama sıcaklığı olan 58 °C’lik yüksek sıcaklığa kadar taşıdığı anlamına gelir. Benzer şekilde ikinci sayı (-22), “düşük sıcaklık derecesi” olarak isimlendirilir ve bağlayıcının gerekli fiziksel özellikleri -22 °C’lik düşük sıcaklığa kadar koruduğu anlamına gelir [4].

2.2.2.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5)

Penetrasyon deneyi, bitümün sertlik veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25 °C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır. Penetrasyonun birimi 10^{-1} mm.dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır. Penetrasyon deney aleti Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

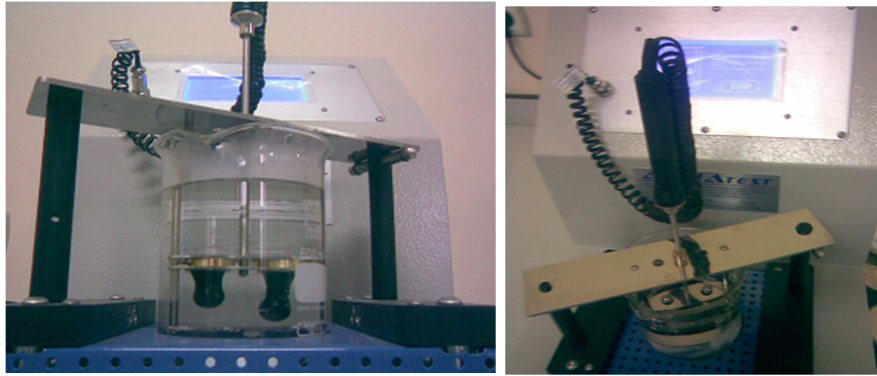


Şekil 2.7 Penetrasyon deney aleti

2.2.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)

Bitümlerin yumuşama sıcaklığının tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilir ve bitüm üzerine standart bir bilye bırakılır. Deney başlangıç sıcaklığı 5 °C’dir ve sıcaklık dakikada 5 °C arttırılır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü maddenin tabana değdiği anda

termometrenin gösterdiği değerdir. Yumuşama noktası deney aleti Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8 Yumuşama noktası deney düzeneği

2.2.2.3. Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589)

Bitümlerin kohezyon mukavemeti, düşük ısılardaki düktiliteleri ile karakterize edilmektedir. Bu deney standardındaki sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerle kohezyonda meydana gelen değişiklik tespit edilebilmektedir. Düktilite, standart kalıp içerisinde hazırlanmış bitümün, 25 °C sıcaklıkta ve 5 cm./dak. hızla çekilerek kopuncaya kadar uzadığı miktardır (Şekil 2.9). Bitümün düktilite değeri, yük altında kopmadan uzayabilmesinin bir göstergesi olup karışımların kayma mukavemetine etki etmektedir.



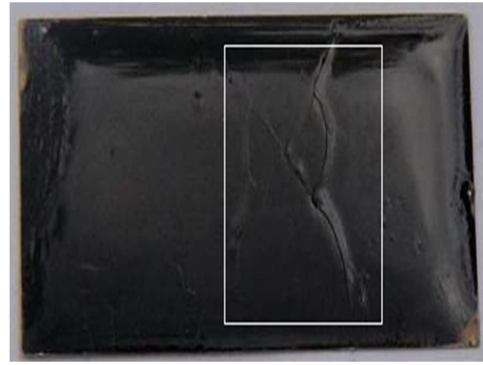
Şekil 2.9 Düktilite deneyi

2.2.2.4. Fraas Kırılma Noktası Deneyi (TS EN 12593)

Fraas kırılma noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki davranışlarını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde $0,4 \pm 0,01$ gr. bitüm, 41×20 mm. boyutundaki plak üzerine bırakılır. Plak, belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak üzerindeki bitümün tam olarak yayılması sağlanır (Şekil 2.10.a). Daha sonra plak ve numune soğumaya bırakılır. Soğuyan numune düzeneğe yerleştirilerek yalıtımlı bölmeye bırakılır. Sıcaklığın dakikada 1°C azaldığı bölmede numuneye dakikada 24 sn. yükleme uygulanır. Sıcaklık düştükçe bitümün rijitliği arttığından uygulanan yük de artmaktadır. İşlemin devamında bitümlü bağlayıcı kritik bir katılığa ulaşır ve yüzeyinde çatlaklar meydana gelir (Şekil 2.10.b). Numunede çatlakların oluştuğu bu sıcaklık değeri kırılma noktası olarak adlandırılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.10 Frass kırılma noktası deney düzeneği (a) - numunede oluşan çatlak (b)

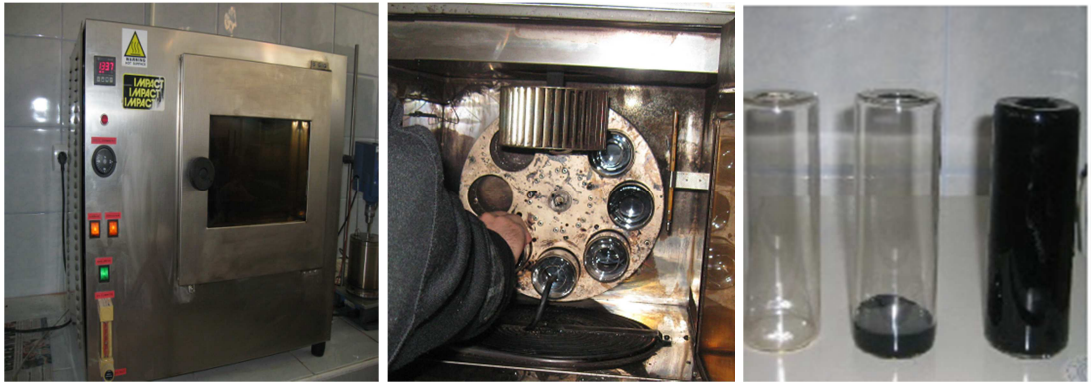
2.2.2.5. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)

Bir bağlayıcının özgül ağırlığı bunun belli bir hacminin ağırlığının aynı hacimde su ağırlığına oranıdır. Bir bağlayıcının özgül ağırlığı başlıca iki bakımdan önemlidir. Birincisi; çok defa ağırlıkla hacim arasındaki bağıntının bilinmesi faydalıdır. Bitümlü kaplamalara ait şartnamelerde oranlar ağırlıkça yüzde cinsinden belirtilir. Buna karşılık bağlayıcılar çok defa hacimce ölçülür. Sıcak karışımlarda ise bağlayıcının genleşme katsayısının belirlenmesi faydalıdır. Böylece herhangi bir sıcaklıktaki özgül ağırlık hesaplanabilir. İkincisi; hidrokarbonlu bağlayıcının cinsinin bilinmesi açısından özgül ağırlık yararlıdır. Özgül ağırlık tayini için piknometre metodu kullanılır. Bu metotta, önce boş piknometre kabı kuru olarak tartılır, daha sonra su ile doldurulur ve tekrar tartılır. Piknometre kabı boşaltılır, kurutulur, içine uygun miktarda bağlayıcı genellikle $2/3$ yüksekliğine kadar ya küçük parçalar

halinde ya da eritilmiş malzeme akıtılarak konur. Eğer ısıtılmış malzeme akıtılacak ise malzeme içinde hava kabarcıkları kalmamasına dikkat edilmesi gereklidir. Piknometre içinde kalan boşluk su ile doldurulur ve tartılır. Deneyde kullanılacak su saf olmalıdır. Deney, genellikle 25 °C ‘de yapılır. Farklı sıcaklıklarda yapılacaksa 25 °C ‘ye çevirmek için çeşitli abaklardan yararlanılır [14].

2.2.2.6. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuvarında RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile simüle edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisini değerlendirmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir [15]. TS EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163 °C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Dönel ince film halinde ısıtma kaybı deney düzeneği

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır [15].

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 TS EN 12607-1'e göre aşağıdaki formül (2.6) kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir.

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.6)$$

2.2.2.7. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kaplamanın servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90-100 ve 110 °C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [16]. Deney aleti Şekil 2.12'de görülmektedir.

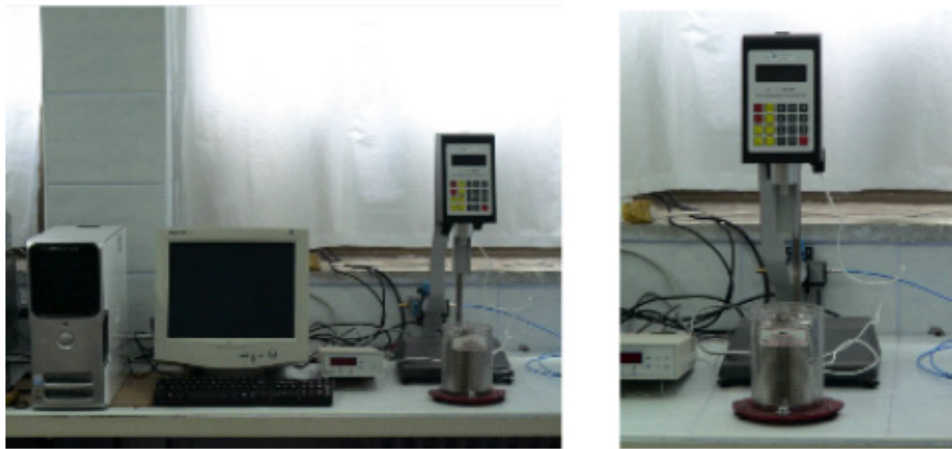


Şekil 2.12 PAV deney aleti

RTFOT ve PAV deney kalıntılarında Superpave deneyleri uygulanmakta, yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir.

2.2.2.8. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 2.13). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmamalıdır [17]. Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. malzeme alınarak sıcaklığı 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilir. Malzemedan yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulur. Numune bölmesi, sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir ve 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletilerek deney yapılır. Deneyde bir motor yardımıyla milin düzenli olarak 20 rpm. hızla dönmesi sağlanmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılır ve bu üç değerin ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilir. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [16]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir.



Şekil 2.13 Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi

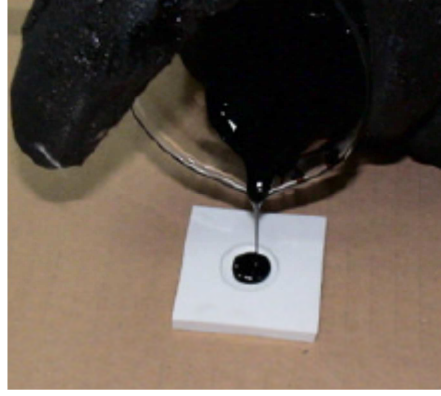
2.2.2.9. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik Kesme Reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm. çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm. çapında ve 2000 mikron yüksekliktedir [15]. Deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 2.14’te görülmektedir.



Şekil 2.14. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi

Deneyde bitümlü bağlayıcı doğrudan plaklar üzerine dökülebildiği gibi silikon kalıplar yardımıyla da numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 2.15’te görülmektedir.



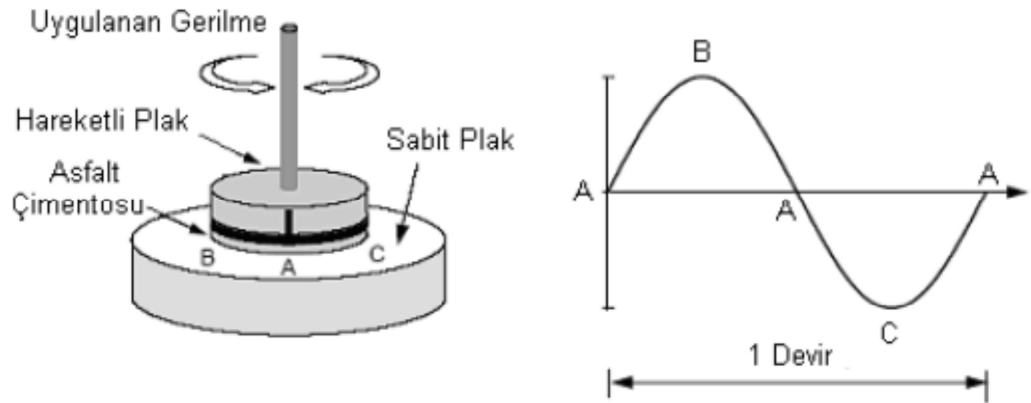
(a)



(b)

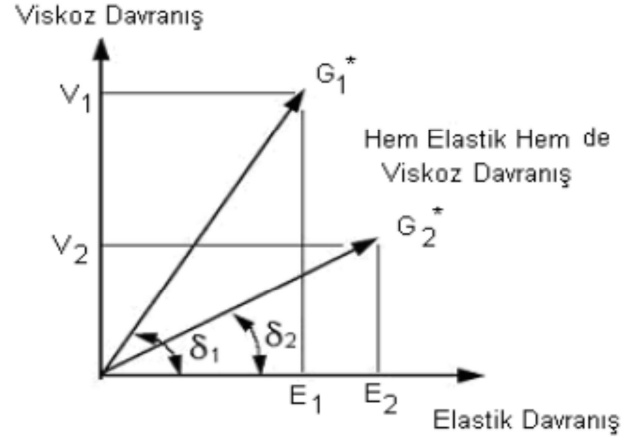
Şekil 2.15 Numunenin silikon kalıba doldurulması (a), üst plağa yerleştirilmesi (b)

Deneyde, Şekil 2.16’da görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtmaması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [16].



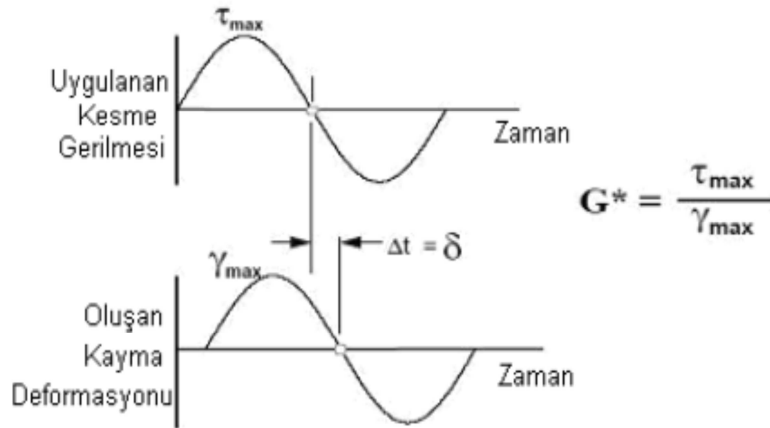
Şekil 2.16 DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri [16]

Dinamik kesme reometresi deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir (Şekil 2.17). G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir [18].



Şekil 2.17 Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği [18]

Viskoelastik davranışı ifade eden Şekil 2.17’de görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yükleme hızı yüksek ve sıcaklık düşük) ifade ederken dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük ve sıcaklık yüksek) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yüklemelerinde asfalt çimentosu hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt çimentosunun visko-elastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt çimentosunun birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi visko-elastik özellik hem G^* ’a hem de δ ’a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun visko-elastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısı Şekil 2.18’de gösterilmiştir [18].



Şekil 2.18 Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi

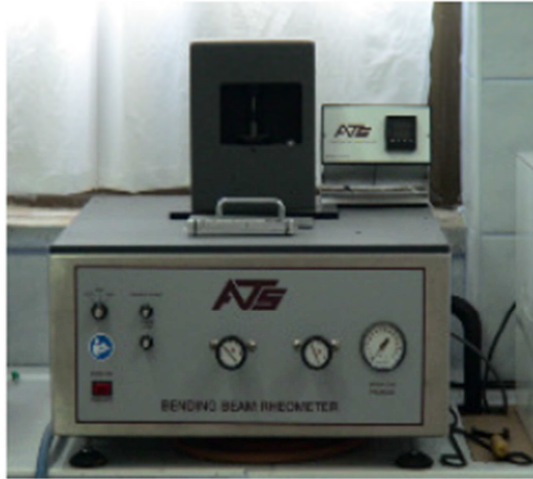
AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Tablo 2.5'te verilmiştir [18].

Tablo 2.5. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri [18]

Bağlayıcı Türü	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minumum 1 kPa
RTFOT	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minumum 2,2 kPa
PAV	Yorulmaya karşı dayanım	Maksimum 5000 kPa

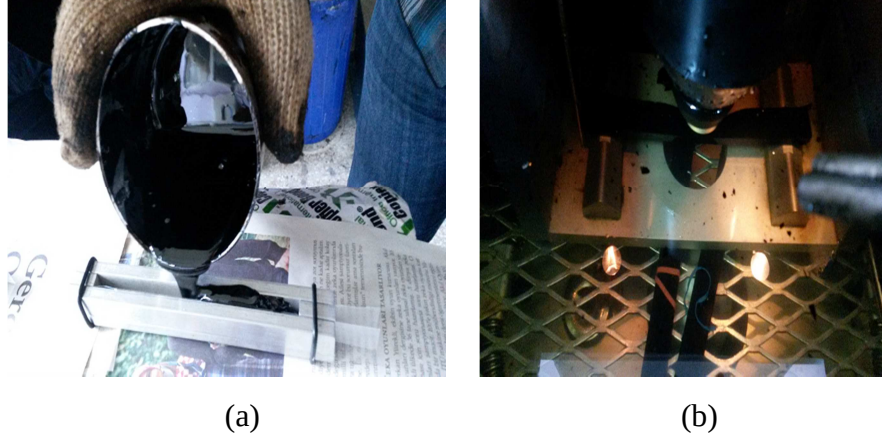
2.2.2.10. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Termoplastik özelliğinden dolayı bitüm, düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmektir [16]. Bu deney için PAV deneyinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 2.19'da görülmektedir.



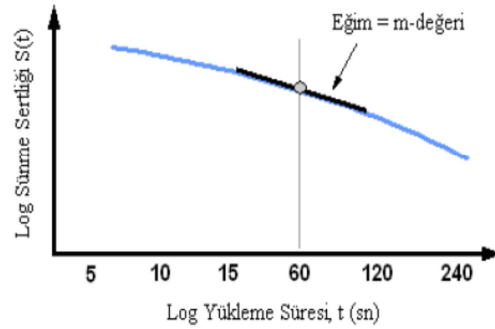
Şekil 2.19 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

Deney boyunca bitümlü bağlayıcı kiriş numunesi, bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. BBR deneyi için numune hazırlanması (a) ve deneyin yapılması (b)

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını bulmada kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımın bir göstergesiyken; sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı belirtmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 2.21). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir [15].



Şekil 2.21 Sünme oranının belirlenmesi [15]

2.2.2.11. Doğrudan Çekme (DDT) Deneyi

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda sahip oldukları rijitlik ile kopma anındaki sünme miktarları arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Bitümlü bağlayıcı çekme gerilmesine tabi tutulduğunda yeterince sünme gösterirse düktil

(sünek), sünme göstermeden koparsa gevrek (kırılgan) olarak adlandırılmaktadır. Yani bitümlü bağlayıcı ne kadar rijit (sert) ise o kadar gevrek ne kadar yumuşak ise de o kadar düktil davranış gösterir. İdeal bir bağlayıcı düşük sıcaklıklarda da bir miktar sünek davranış sergilemelidir. Aksi takdirde trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada düşük ısı çatlakları meydana gelmektedir [8].

BBR deneyi ile belirlenen sünme rijitliği, bağlayıcının kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak karakterize etmemektedir. Bu deneyle rijit ama düktil özellik gösteren bağlayıcıların kırış eğme reometresi deney sonuçları 300 ile 600 MPa. arasında ise bu deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bağlayıcı BBR sonuçları, 300 MPa.'dan daha az ise bu deneye ihtiyaç duyulmamaktadır. Deney; orijinal, PAV'da yaşlandırılmış ve RTFOT aletinde yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanabilmektedir [15].

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

BSK'ların servis ömürleri boyunca iyi performans göstermeleri için uygulandıkları bölgenin iklim şartlarına bağlı olarak yeterli stabilite, rijitlik, durabilite, yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik ve kayma direncine sahip olmaları gereklidir [8].

2.3.1. Stabilite

Stabilite terimi, mukavemet ile yakından ilgili olup kaplamaların trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Stabilitenin yüksek olması rijitliği arttırdığından yüksek sıcaklıklarda deformasyon olasılığını azaltırken düşük sıcaklıklarda çatlama olasılığını arttırmaktadır. Bu yüzden stabilitenin belirli bir optimum değerinde olması istenmektedir. Stabilite, laboratuvarında Marshall stabilite deneyiyle tespit edilebilmektedir [8].

2.3.2. Rijitlik

BSK'lar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan mekanik özelliklerini belirlemek için 'Rijitlik Modülü' kullanılmaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Bu sebeple yükleme süresi azaldıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu ve asfaltın katılığı arttıkça karışımın rijitliği de artmaktadır [8].

2.3.3. Durabilite

BSK'ların durabilitesi, trafik ve çevre şartlarının aşındırma etkisine direnç göstermesi olarak ifade edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların; bağlayıcının özellik değiştirmesine, agregaların kırılmasına ve ufalanmasına, bağlayıcının soyulmasına karşı dayanıklı olması istenmektedir. Bağlayıcı oranını yükseltilmesiyle film kalınlıklarını arttırarak, yüksek kıvamlı bağlayıcı kullanarak, iyi bir sıkışma sağlayarak ve yoğun gradasyonlu ve sağlam agregalar kullanarak durabilitede artma sağlanabilmektedir [8].

2.3.4. Yorulma Mukavemeti

Karışımın, taşıyabileceği maksimum çekme mukavemeti aşılmadan, yorulma çatlakları oluşuncaya kadar geçirebileceği maksimum yük tekrür sayısına yorulma mukavemeti denilmektedir. Yoğun gradasyonlu agrega kullanılarak ve kaplama kalınlığı arttırılarak rijitliğin artması sağlanabilmektedir. Rijitliği yüksek olan karışımlarda deplasman az olacağından yorulma mukavemetinde artış sağlanacaktır. Ayrıca karışımda elastikiyeti sağlayan bağlayıcının miktarını arttırılması ve kıvamı düşük bağlayıcı kullanılmasıyla, daha esnek bir karışım elde edilmekte bu sayede de yorulma mukavemetinde artış sağlanmaktadır [8].

2.3.5. Esneklik

BSK'larda yüksek sıcaklıklar için rijitlik ne kadar önemliyse düşük sıcaklıklar içinde esneklik o kadar önemlidir. Yeterli esnekliğe sahip karışımlar, düşük sıcaklıklarda eğilmeden kaynaklanan çatlak oluşmasına izin vermeyerek kaplama ömründe artış sağlamaktadır. Ayrıca yol eksenine yarma ve dolgulardan geçtiğinden dolgulardaki farklı oturmalarla kaynaklanan gerilmeler yeterli esnekliğe sahip karışımlar sayesinde karşılanabilmektedir [8].

2.3.6. Geçirimsizlik

Bitümlü sıcak karışımlarda geçirimsizlik, kaplama yapısı içerisine hava ve suyun nüfuz etmesinin bir ölçütüdür. Geçirimsizlik arttıkça, hava ve suyun etkisiyle bağlayıcının yaşlanması hızlanmakta, soyulma mukavemeti azalmakta ve donma-çözülme tekrürü sonucu agrega parçalanması artmaktadır. Bağlayıcı miktarı

arttıkça, agrega gradasyonu ve karışımın yoğunluğu arttıkça ve de sıkışma arttıkça geçirimsizlik genel olarak artmaktadır [8].

2.3.7. Kayma Direnci

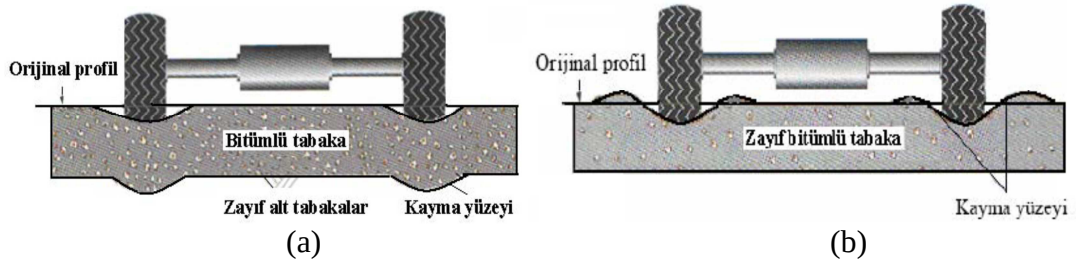
Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda savrulmaması için teker ile kaplama arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir [8].

2.4. 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 oluşan bozulmaların başlıca nedenlerinin tasarım, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçimi, iklim koşullarının ağırlığı ve denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlamalar ve ayrışmalar olmak üzere, en fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları, kusma ve sudan kaynaklanan bozulmalardır [4].

2.4.1. Tekerlek İzi Oluşumu

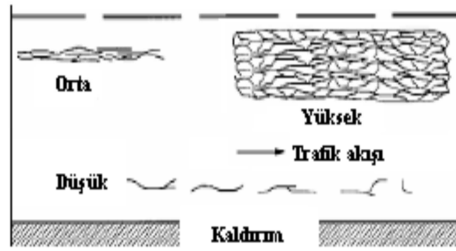
Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir. Yetersiz sıkıştırma, yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti, yuvarlak dere malzemesi kullanımı, aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi, yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt, ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı tekerlek izi oluşumuna neden olan durumlardır. Şekil 2.22’de zayıf bir alt tabakada (a) ve kaplamada (b) tekerlek izi oluşumu görülmektedir [4].



Şekil 2.22 Zayıf alt tabakada (a) ve kaplamada (b) tekerlek izi oluşumu [4].

2.4.2. Yorulma Çatlakları

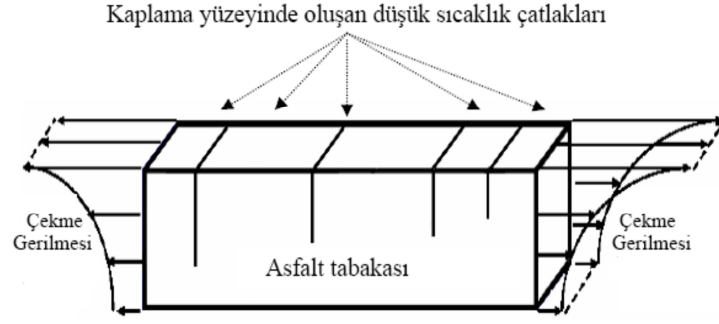
Yorulma çatlakları, ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle oluşmaktadır. Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tüm kesiminde veya belirli kesiminde oluşurlar (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Yorulma çatlaklarının dereceleri [4].

2.4.3. 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 oluşan enine doğrultudaki çatlaklardır. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.24'te görüldüğü gibi yüzeyde çatlaklar oluşur .



Şekil 2.24 Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları [4]

2.4.4. Kuma

Karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması olayı kuma olarak tanımlanır. Kuma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir [9].

Kuma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında, basınçla da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kumaya sebep olabilir [9].

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

Yol üstyapılarının tasarımından amaç, üstyapının yapım maliyeti ve hizmet süresi boyunca yapılacak bakım masraflarını minimize ederken, trafik yüklerini etkin bir şekilde dağıtabilen bir mühendislik yapısı inşa etmektir [19].

Üstyapı tasarımında, bitümlü sıcak karışımlar için tasarım yöntemini ve tasarım koşullarını genellikle kaplama yapımından sorumlu olan kuruluşlar belirlemektedir. Bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan birçok yöntem olmasına karşın, kabul görmüş ve geliştirildikleri 1930'lu yıllardan beri günümüze kadar kullanılmış ve hala kullanılmaya devam eden karışım tasarım yöntemleri Hveem, Marshall ve Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi olarak sıralanmaktadır.

Karayollarında özellikle yetmişli yıllardan başlayarak artan taşıt miktarı ve dingil ağırlıkları, o ana kadar uzun ve tatminkâr performans sağlayan bitümlü

karışımların, ağır dingil yükleri altında deformasyona uğraması dolayısıyla geleneksel Hveem tasarım yöntemlerinin günümüz gelişmiş teknolojisi paralelinde gelişen ağır trafik yüklerine maruz yollarda kullanılamayacağı görülmüştür. Bu nedenle sıklıkla kullanılan Marshall ve Superpave yöntemleridir.

Marshall Yöntemi ile dizayn kavramı, Amerika Birleşik Devletleri Mississippi Devlet Otoyolları Departmanında çalışan Bruce Marshall tarafından geliştirilip formüle edilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri mühendislik şirketinin ileri araştırma ve korelasyon çalışmalarıyla, Marshall Deney Yöntemi geliştirilerek bugün kullanılan son halini almıştır.

Daha sonra bu dizayn yöntemi, “American Society for Testing and Materials” tarafından standartlaştırılmıştır. Bu yöntem penetrasyon veya viskozite derecesi belli asfalt çimentolarına ve maksimum boyutu 25 mm (1 inç) veya daha az olan agregalar kullanarak yalnızca sıcak karışım asfalt kaplamalara uygulanmaktadır [21]. Ülkemiz karayolları karışım dizaynlarında da bu yöntem kullanılmaktadır. Marshall Metodu için işlem deney numunelerin hazırlanması ile başlar. Bütün bu işlemlerin başlangıcı için şunlar takip edilir:

- Kullanım için önerilen agrega ve bitüm, proje şartnamelerini sağlamalıdır.

- Agrega sınıflarının proje şartnamelerinin istekleri doğrultusunda oranlandırılması yapılır.

Kullanılacak malzemelerin yoğunluk ve boşluk analizleri, karışımda kullanılacak agregaların hacim özgül ağırlıkları ve asfalt çimentosunun özgül ağırlıkları tespit edilir [22].

Superpave Tasarım Yöntemi, Superpave (**Superior Performing Asphalt Pavements**) olarak isimlendirilen “üstün performanslı kaplama” yöntemidir. “Superpave” yöntemi, A.B.D. ’deki “Stratejik Yol Araştırmaları Programı” (“Strategic Highway Research Program” (SHRP)) tarafından geliştirilmiştir [4].

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) karışım tasarım yönteminde bitümler, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmışlardır. Bu tür bitümlere performans sınıfı (Performance Grade) bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Bununla beraber, Superpave yöntemi, asfaltın rafineriden çıkışından kaplama olarak hizmet ömrünün sonuna kadar geçen süre içerisindeki oksidasyon yaşlanmasını da dikkate almakta ve asfalt deneylerinde bu durum simüle edilmektedir. Superpave bitüm deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler

bitümün; yaşlanma, işlenebilirlik, tekerlek izi oluşumu, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir seri deneyler gurubudur [3,23].

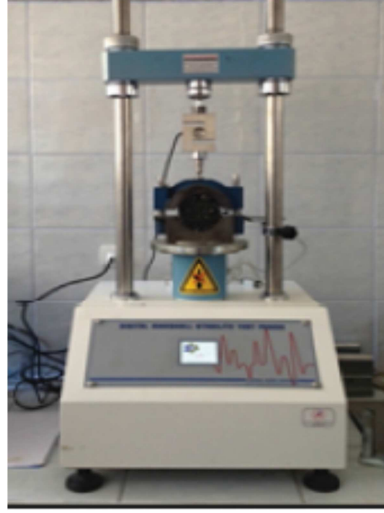
2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak belirlenerek bilinmesine bağlıdır. Analitik üstyapı tasarımında, yapının analizi için gerekli olan yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve malzemelerin muhtemel bozulma şekillerini ortaya çıkaran performans özellikleri olmak üzere iki grup malzeme özelliği göz önüne alınır. En önemli performans özellikleri, bitümlü tabakalarda oluşan yorulma çatlağı ile üstyapıdaki her türlü tabakada görülen kalıcı deformasyondur [19].

Bitümün özelliğinden dolayı bitümlü karışımlar visko-elastik ve termo-plastik özellik gösterdiklerinden, laboratuvar deneylerindeki sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları, sıkıştırma gibi koşullar mümkün olduğunca arazi şartlarına benzer hale getirilmelidir. Arazideki gerilme şekilleri laboratuvarda güçlükle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır.

2.6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre uygulanmaktadır. Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Standarda göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler 60 ± 1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 40 dakika bekletilmektedir. Kırma çenesi ise 60 ± 1 °C sıcaklıktaki suda 30 dakika veya 60 ± 1 °C sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalananak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 2.25'te görülmektedir.



Şekil 2.25 Marshall stabilite ve akma deneyi cihazı

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı andaki 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 eşitlik (2.7) yardımıyla tespit edilmektedir [4].

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (2.7)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

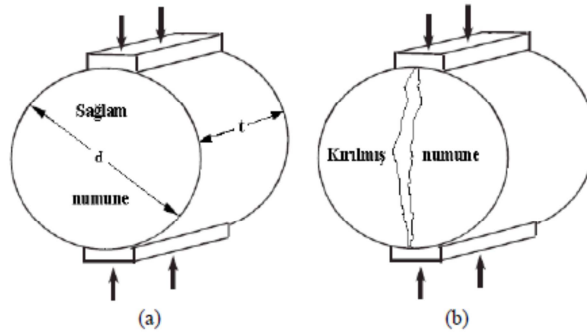
Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [24-27].

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri kalıcı Marshall stabilitesi yöntemidir.

Kalıcı Marshall stabilitesi yönteminde numuneler 60 ± 1 °C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır [28,29]. 24 saat 60 °C suda bekletilen numunelerin stabilite değerinin normal stabilite değerine oranlanması ile kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

2.6.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel olarak 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak AASHTO T245 veya ASTM D4123'e göre yapılır ve numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [4,10]. Şekil 2.26'da numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu görülmektedir.



Şekil 2.26 ITS deneyi yüklem durumu (a) ve kırılma düzlemi (b) [4]

Dolaylı çekme mukavemeti (2.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [4].

$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi h d} \times 100 \quad (2.8)$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

P_{maks} : Maximum yük (kN),

h : Numune yüksekliği (mm),

d : Numune çapı (mm).

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerinin saptanmasını içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Bununla birlikte, bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla kullanılabilir [10].

ITS deneyi, yaygın olarak asfalt karışımların kohezyon kuvvetini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılabilir. Deney, karmaşık test ekipmanlarını gerekli kılmaz ve laboratuarda Marshall veya Yoğurtmalı pres cihazlarıyla üretilmiş biriketlenmiş uygulamaktadır. Asfalt karışımın ITS değeri, asfalt karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olarak artar ve bu yüzden bağlayıcının özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Karışım kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değeri, karışımın orta sıcaklıklardaki stabilitesini sağlar ve durabilite ve soyulma potansiyelinde olduğu kadar tekerlek izi direnciyle ilişkili olabilir [4].

2.6.3. Modifiye Lottman (AASHTO T-283) Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların yol kaplamasında kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla yapılan en önemli çalışmalardan birisi karışımın suya karşı hassasiyetinin ölçülmesidir. AASHTO T-283 deneyi, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Lottman tarafından 1970'li yıllarda geliştirilen deney şartları üzerinde bazı değişiklikler yapılarak modifiye edilmiş ve AASHTO tarafından standart hale getirilmiştir. Deneyle, karışımda sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybı tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, sıcak karışımların yol üzerindeki uzun dönem servis süreçlerinde, soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [4].

Sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki gruba ayrılmakta ve bu iki gruba numune dolaylı çekme deneyine tabi tutularak karışımın dayanım kaybı belirlenmektedir. Karışımın dolaylı çekme

mukavemetinin alınmasının sebebi, sıcak karışım aşınma tabakaların sürekliliği için en önemli parametrelerden birinin, sıcak karışımın çekme dayanımı olmasıdır. Bu dayanımın düşük olması halinde karışım, trafik ve çevre etkileri ile oluşan çekme gerilmelerine karşı koyamayarak bozulmaktadır [30].

Deneye tabi tutulacak her test gurubu için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet numune hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri tepsilere konarak oda sıcaklığında 2 saat soğutulduktan sonra 60 °C'deki fırına yerleştirilerek 16 saat bekletilir. Sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletilen karışım numuneleri %6-8 hava boşluklarında sıkıştırılır ve 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kırılır. Şartlandırılacak numunelere ise 13-67 kPa emme basıncı altında 5-10 dakika süreyle bir manometre ile vakum uygulanarak %70-80 oranında su ile doygun hale gelmesi sağlanır. Doygun hale getirilen numuneler 16 saat süreyle -18 °C'deki buzluğa yerleştirilir. Buzluktan çıkarılan numuneler 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak 25 °C'deki su banyosuna yerleştirilir ve 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur [4,31]. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ($ITS_{yaş}$), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı (2.9) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [4,31,32].

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (2.9)$$

$ITSR$: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

$ITS_{yaş}$: Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

ITS_{kuru} : Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa).

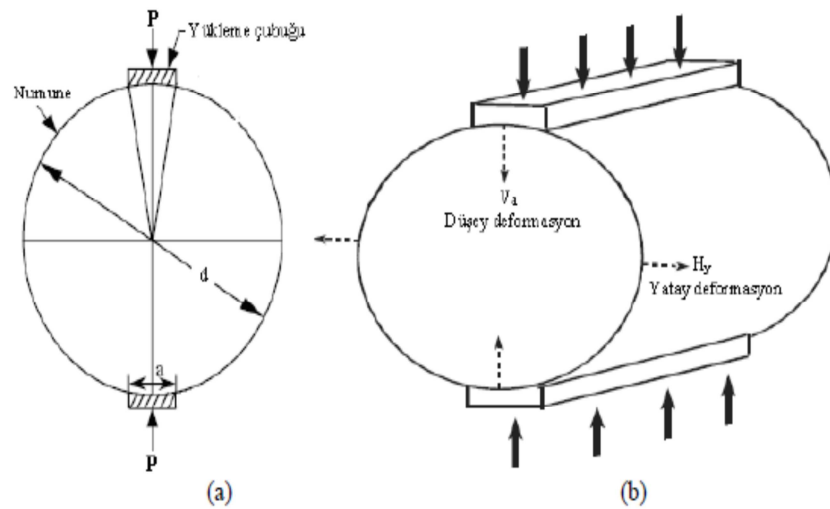
Bitümlü sıcak karışımın su etkilerine karşı yeterli dayanımda kabul edilebilmesi için Superpave karışım dizayn metoduna göre $ITSR$ değerinin en az %80 olması istenmektedir [4,31]. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değerin en az %70 olması yeterlidir. Deneyde %80'den daha düşük $ITSR$ değerine sahip sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dirence sahip olmadığı kabul edilerek karışımın suya karşı direncinin artırılması istenmektedir. Karışımın su etkilerine

karşı direncinin artırılması için genellikle soyulma önleyici katkı maddeleri ilave edilmekte ve katkı kullanılarak modifiye edilen karışımlarda ise ITSR değerinin %85 değerinden az olmaması istenmektedir [4,31].

2.6.4. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi

Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi, dinamik yükler altındaki bitümlü karışımların esnekliğini tespit etmek amacıyla kullanılan bir deneydir. Esneklik modülü, bitümlü kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve bitümlü kaplamaların en önemli performans özelliklerinden biri olarak kabul edilir. Ayrıca, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder [4]. Tek eksenli yükleme altında elde edilen esneklik modülü, genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır [4,10].

Bu yöntemin amacı, tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuarda hazırlanmış ya da araziden alınan karot numunelerinin esneklik modülü değerini saptamaktır. Deney farklı sıcaklıklarda ve yükleme süreleri altında yapılmakta ve her bir sıcaklık ve yükleme süresi için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenmektedir [4,10]. ITSM deneyi ile esneklik modülü değerinin belirlenmesinde, numunelere yarı sinüzoidal bir formda, Şekil 2.27’de görüldüğü gibi düşey yönde basınç yükü, tekrarlı darbeler şeklinde uygulanmaktadır [10].



Şekil 2.27 Dolaylı çekme deneyi (a) ve şematik görünüşü (b) [4]

Deney sonucunda, numuneye uygulanan dinamik yük ve bu yükün neden olduğu toplam yatay deformasyonu ölçülür ve karışım için bir poisson oranı alınarak numunenin esneklik modülü (E_m) bağıntı (2.10) ile hesaplanır [4,10].

$$E_m = \frac{P \times (v + 0,2734)}{H_y \times h} \quad (2.10)$$

E_m : Esneklik modülü (Mpa),

P : Maksimum yük (N),

H_y : Toplam yatay deformasyon (mm),

H : Numune kalınlığı (mm),

v : Poisson oranı.

Karışımın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörler sıcaklık, yükleme frekansı veya hızı ve karışımın hava boşluğudur. Düşük sıcaklıklar, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı karışımın esneklik modülünü arttırmaktadır [4].

Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin poisson oranları aşağıdaki (2.11) ve (2.12) bağıntıları ile bulunur [4].

$$v = 3,59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \quad (100 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (2.11)$$

$$v = 4,09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \quad (150 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (2.12)$$

H_y : Yatay deformasyon (mm),

V_d : Düşey deformasyon (mm).

Yapılan çalışmalarda, poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5 °C için 0,25; 25 °C için 0,35; 40 °C için 0,40 olarak değiştiği görülmüştür. Ancak; çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde 0,35 oranının alınması tavsiye edilmektedir [4].

2.6.5. Dolaylı 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 çatlağı olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [5]. 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 [1]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Dolaylı çekme yorulma deneyinde, numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekrür sayısı belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekrür sayıları belirlenmektedir. Böylece yorulma ömrü (N_f) ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki (2.13) Wöhler formülünden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (2.13)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir [15]. 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 az 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 [15].

Dolaylı çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. Silindir

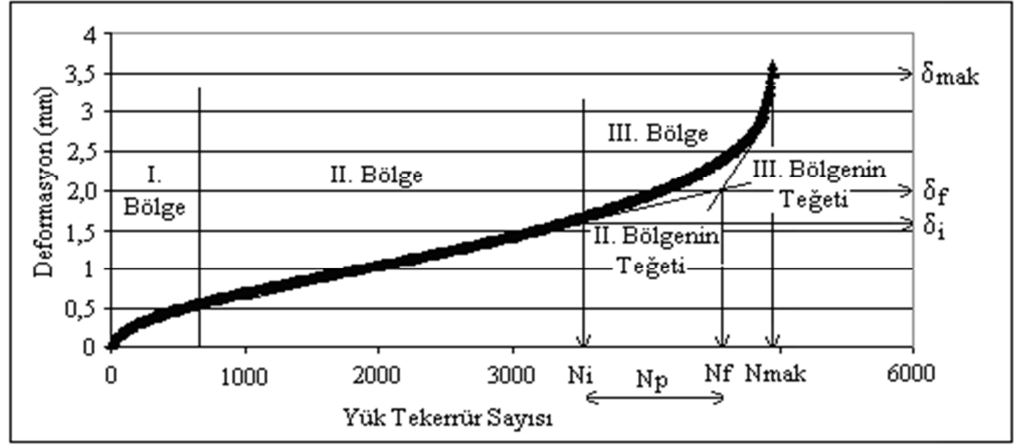
şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarılmaya meydana gelmesine neden olmaktadır [3].

Gerilme kontrollü dolaylı çekme yorulma deneyi, UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2.28’de deney düzeneği görülmektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25 °C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 2 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 doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 2.28 Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 2.29’da temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [15].



Şekil 2.29 Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül (2.14) aşağıda verilmiştir [15]. Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir [15].

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{f_{\max}} - \delta_f} \quad (2.14)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f_{\max}}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

δ_f : Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

2.6.6. Dinamik Sünme Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların dinamik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla, numune üzerine bir yük uygulayıp yükleme altında oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanmaktadır [4,19]. Sünme modülü deneyi, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yükleme altında sünme modülü değerinin belirlenmesini içermekte ve karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla

kullanılmaktadır. Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli ya da tekerlek izinin hesaplanması ve sertliğinin tahmininde kullanılmaktadır. Bu değer ayrıca numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir. Deney, sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı içeriğinin ve sünme yükleme zamanının etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir. Sünme modülü, karışımın fiziksel özellikleriyle birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir ve ayrıca verilen bir trafik ve çevre koşulları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir [4,10].

Standart deney sıcaklığı 40 °C olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da deney yapılabilir [4,32].

Numunede bozulma meydana gelinceye kadar devam eden deney sonucunda yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Yorulma deneyinde de görüldüğü üzere üç aşamalı kalıcı deformasyon davranışı bitümlü karışımların temel özelliğidir. Birinci bölgede, numunenin sahip olduğu boşluklardan dolayı konsolidasyon meydana gelerek bu bölgede karışımın hacmi azalmakta ve şekil değiştirme, başlangıçta önemli oranda artmakta daha sonra azalmaktadır. İkinci bölgede uygulanan tekrarlı yük sonucu toplam şekil değiştirmede lineere yakın bir değişim gözlenmektedir. Üçüncü bölge ise ikinci tür kalıcı deformasyonun olduğu bölge olup bu bölgede kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir.

3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM (BSK) MODİFİKASYONU

Modifikasyon, yol üstyapılarında kullanılan bağlayıcının veya karışımın performansını arttırmak amacı ile bağlayıcının içine çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda ve şartlarda karıştırılması olarak tanımlanmaktadır [33].

Son yıllarda yapılan araştırmalar bitüme, bitümle uyumlu bazı polimer ve katkıların eklenmesinin bitümün reolojik davranışını etkilediğini, özelliklerini iyileştirdiğini ve bitüme üstün özellikler kazandırdığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, bitüme polimer ilavesinin ana amacı, bitümün viskoelastik davranışını değiştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmaktır [34].

Modifikasyonun bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Bitümün servis sıcaklıkları aralığını genişletmek, yumuşama noktasını yükseltmek ve penetrasyon değerini düşürmek,

- Bitümün sıcaklık değişimlerine duyarlılığını azaltmak (Penetrasyon İndeksini yükseltmek),

- Bitümün reolojik ve mekanik özelliklerini değiştirmek. Geniş sıcaklık ve yükleme hızı aralıklarında kalıcı deformasyona ve kırılmaya karşı mukavemet arttırmak,

- Tekrarlı yükler altında yorulma mukavemeti arttırmak,

- Yaşlanmayı (oksidasyon vb. dolayısı ile zamanla özelliklerini kaybetme) yavaşlatmak (modifiye bitümün yüksek viskozitesi, agrega etrafındaki bitüm filminin kalınlaşmasını sağlamaktadır),

Modifiye edici katkıların etkili olabilmesi ve hem pratik hem de ekonomik uygulaması için aşağıdaki koşulları sağlanmalıdır [34];

- Kolayca bulunabilir olması,

- Bitümle karıştırma sıcaklıklarında bozulmaması,

- Bitüm ile karışabilmesi,

- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitüme fazla viskoz, serme, sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında ise çok rijit veya kırılğan hale getirmemesi,

- Yüksek hizmet sıcaklıklarında akmaya karşı direnci iyileştirmesi,

-Ekonomik olması.

Bu yukarıdaki sıralanan şartları sağlamak üzere çok çeşitli bitüm modifikasyonu uygulamaları yapılmaktadır. Bu uygulamalar arasında sülfür ilavesi, kauçuk ilavesi, organo-manganez bileşikler ilavesi ve polimer ilavesi yolu ile bitüm modifikasyonu sayılabilir. Bu katkılardan en sık kullanılanı ise polimerlerdir [35].

Tablo 3.1’de bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddesinin tipini, özelliklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren bir genel sınıflandırma gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [10]

Tip	Özellikler	Modifiyerlerin Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
1. Filler	- Mineral Filler - Taş Tozu - Kireç - Portland Çimentosu - Uçucu Kül - Karbon Siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	- Sülfür - Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber		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

Modifikasyonun bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkileri göz önüne alınarak yapılan bir diğer sınıflandırmada polimer olan ve polimer olmayan katkı türleri baz alınmaktadır. Bu şekilde yapılan sınıflandırmaya göre bitüm modifikasyon tipleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Bitüm modifikasyon tipleri [4]

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer Olmayan Katkıyla Modifikasyon 1. Fillerler 2. Soyulma Önleyici Katkılar 3. Genleştiriciler (Ekstendenler) 4. Antioksidanlar 5. Organo-metal Bileşimleri 6. Diğerleri	Kıl, Siyah Karbon, Uçucu Kül Organik Aminler ve Amidler Ligrin, Sülfür Çinko ve Kurşun Antioksidanları, Fenolikler, Aminler Organo Mangan ve Organo Kobalt Bileşimleri Organo Karbon Bileşimleri, Gilsonit, Silikon, İnorganik fiberler
II. Polimer Katkıyla 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 Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA) Epoksi Reçineler Sentetik Butadien kopolimer (SBR), Stiren Butadien Stiren Kopolimer (SBS), Etilen Prokplendien Harmolipier (EPDM), İsobüten İsopren Kopolimer (IIR) Polyester, Fiberler, Polipropen Fiberler
III. Kimyasal Reaksiyon Modifikasyonu	Katkı Reaksiyonu (bitüm + monomer) Volkanizasyon (bitüm + sülfür) Nitrosyon Reaksiyonu (bitüm + nitrik asit)

Günümüzde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş asfalt modifiyer türleri ve bunların bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması ile oluşabilecek ana kusurları azalttığı ve iyileştirdiği kanıtlanan veya ifade edilen sınıflandırması ve olası yararları Tablo 3.3’te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Yaygın kullanılan asfalt modifiyerlerin muhtemel olumlu etkileri [4]

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSÇ ³	NH ⁴	Y ⁵
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x				x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Genleştiriciler (Ekstendenler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler- Elastomerler	Styrene butadiene di-block SB	x		x	x	
	Styrene butadiene triblock/radial block (SBS)	x	x	x		
	Styrene isoprene (SIS)	x				
	Styrene ethylbutylene (SEBS)					
	Styrene butadiene rubber latex SBR	x		x		
	Polychloroprene latex	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
Polimerler- Plastomerler	Acrylonite butadiene styrene (ABS)	x				
	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
Ufalanmış kauçuk	Polypropylene	x				
	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX Asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
Soyulma önleyiciler	Gilsonit	x			x	
	Aminler: Amidoaminler				x	
	Polyaminler				x	
	Polyamidler				x	
	Sönmüş kireç				x	
Fiberler	Organo-metallikler				x	
	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x		x		
	Fiberglass					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: selüloz	x				
Antioksidanlar	Mineral	x				
	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Sönmüş kireç				x	x
	Fenollar					x
Aminler					x	x
¹ : Kalıcı Deformasyon		⁴ : Nem Hasarı				
² : Yorulma Çatlağı		⁵ : Yaşlanma				
³ : Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

Kullanılacak en uygun katkı maddesinin seçiminde aranan tek kriter katkının bitüme veya karışıma sağlayacağı performans değildir. Bunun yanında katkı maddesinin üretiminde çevresel uyumu ve ekonomik olması gibi faktörler de katkının seçiminde göz önünde bulundurulmak zorundadır [36].

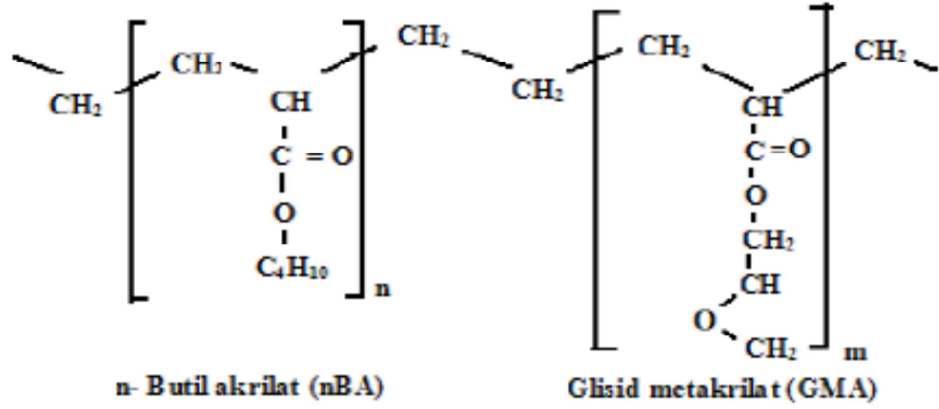
3.1. Modifikasyonda Katkı Olarak Kullanılan Elvaloy Ret ve Özellikleri

Çalışmamızda kullandığımız polimer katkı, plastomer modifikasyon katkısı olan Elvaloy Ret, DuPont firması tarafından üretilen reaktif etilen terpolimerdir. Elvaloy Ret; bitüme düşük miktarda eklenmek suretiyle, geliştirilmiş elastomerik özelliklere sahip kalıcı modifiye edilmiş bir bağlayıcı oluşturur. Elvaloy Ret; top şeklinde, yuvarlak, küçük küçük ve beyazımsı bir görünüme sahiptir (Şekil 3.1).



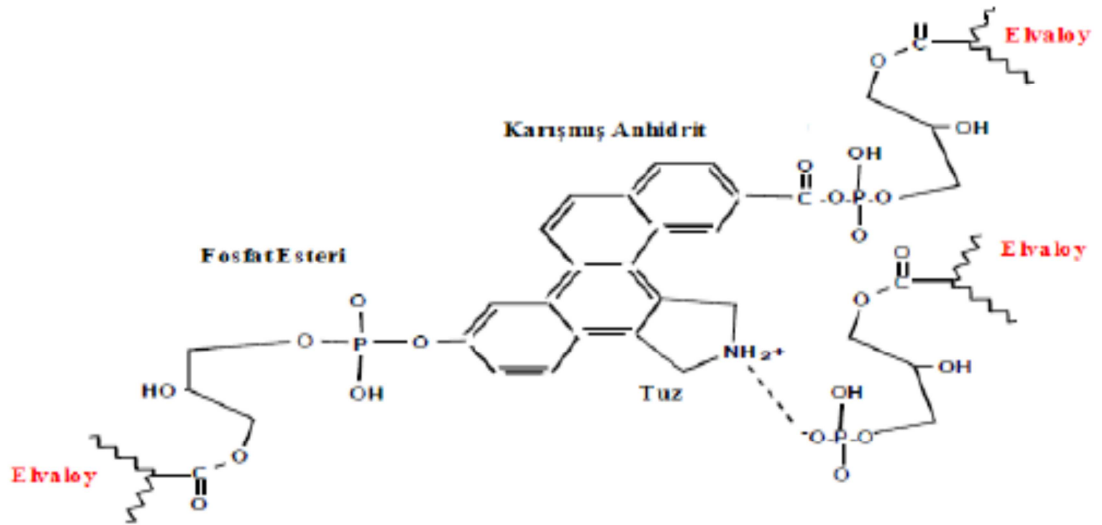
Şekil 3.1 Elvaloy Ret [40]

Elvaloy Ret, bitümün içerisindeki asfaltinin karboksilik asit gruplarıyla tepkimeye girerek Şekil 3.2'deki gibi bitüme bağlanan yeni kimyasal bir yapı oluşturur [38].



Şekil 3.2 Elvaloy Ret'in kimyasal yapısı [39]

Reaktif etilen terpolimer olan Elvaloy Ret yapısında etilen, n-bütül akrilat ve glisid metaakrilatı (GMA) gelişigüzel içeren bir terpolimerdir. Moleküler ağırlık ve komonomer basamaklar polimerin üretimi esnasında farklılıklar gösterebilir. Elvaloy Ret bitümle karıştırıldığında ve ısıtıldığında asfaltın karboksilik asit grubuyla kimyasal tepkimeyi veren GMA kısmıdır. Tepkimeden sonra Elvaloy Ret terpolimerleri asfalt moleküllüyle kovalent bağ yapar ve ayrılmaz [40].



Şekil 3.3 Bitümün Elvaloy ile tepkimesi [40]

Elvaloy Ret ile yüksek sıcaklıklarla ve trafik yüküyle savaştan daha emniyetli, uzun ömürlü asfalt yollar inşa edilmektedir [40].

Polimer modifikatörlü asfaltların (PMA) tercih edilmesinin en büyük sebeplerinden biri soğuktan dolayı oluşan çatlaklara karşı direnebilen ve tekerlek izi oluşturmeyen kaplama malzemesi kullanımına izin vermesidir. Polimer

modifikatörlü olarak tasarlanmış bir asfalt kaplamalı yol, yüksek oranda elastikiyet göstererek, bugünün ağır trafik yüklerine uzun süre dayanmakta, yorulmadan ve çatlak oluşturmada daha uzun süre hizmet vermektedir. Asfalt bağlayıcılarının zayıf özellikleri, Elvaloy Ret'in sunmuş olduğu modifiye edilmiş asfalt çözümleri sayesinde ortadan kalkmakta, asfaltın performansını artırmaktadır [41].

Elvaloy Ret ile yapılan sıcak karışım asfaltlar tekerlek izi oluşumuna, soğuktan çatlamaya, soyulmaya ve aşınmaya/yorulmaya karşı dirençlidir. Elvaloy Ret ile inşa edilen yollar 1991'den beri kullanımdadır ve uzun süreli dayanıklılık göstermektedirler. Ayrıca Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi (National Center for Asphalt Technology - NCAT) tarafından modifiye edilmemiş asfaltlar ile polimer-değişkenli (PMA) asfaltlar içeren SHRP Superpave karışımları karşılaştıran testlerde tekerlek izi direnci ile ilgili veriler Elvaloy Ret ile yapılan karışımların üstünlüğünü ortaya koymaktadır [41].

Bahsedilmiş olan kullanım avantajları dışında, Elvaloy Ret, PMA'lar arasında uygulama avantajlarıyla da ön plana çıkmaktadır. İnşaat firma yetkilileri Elvaloy Ret içeren polimer modifiyeli asfaltların daha az yapışma ve temizlik problemleriyle daha hızlı ve kolay serildiğini belirtmektedirler. Ayrıca diğer modifikasyon polimerlerinin aksine Elvaloy Ret, depolanabilir bir modifiye asfalt yaratmaktadır. Bu nedenle, kışın modifiye edilen asfalt depolanabilir ve daha sonra yazın serilmek üzere kullanılabilir. Bu özelliği Elvaloy Ret'i rafineride modifikasyon işlemi için ürün alternatifi yapmaktadır. Daha hızlı sıkılaştırma özelliği sayesinde, az hatayla daha hızlı serme işlemi ve trafik kabulü sağlayan Elvaloy Ret, daha kolay temizlenebilmesi özelliği sayesinde etkin işlemleri maliyet tasarrufu sağlayarak yapmaktadır. Daha az ısı kullanan ve sızıntıyı engelleyen Elvaloy Ret, uzun süre kararlı yapıda depolanabilmesi sayesinde uzun sevkiyat ve gecikmeleri tolere eder [41,42] .

3.2. Literatür Çalışması

Son zamanlarda hızla artan modifiye bitüm ve modifiye karışım çalışmaları, farklı katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımların performansına olan etkilerini tespit etmek üzerine yoğunluk kazanmaktadır. Bu kapsamda bitüm modifikasyonunda daha çok polimer kökenli katkı maddeleri kullanılmış olup, kullanılmaya da devam edilmektedir.

Polimerler, birbirinin tekrarı olan ünitelerin (monomerler) kimyasal bileşimi ile oluşan makro moleküllerdir. Molekül ağırlıkları 70.000-80.000 hatta 200.000-300.000 olabilmektedir. Zincirin uzunluğu ve molekül ağırlığı polimerizasyonla sağlanan dağılıma bağlıdır [34].

İnşaat mühendisliğinde, bitümlerin modifikasyonunda kullanılan polimerler, en genel haliyle; elastomer ve plastomer olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu polimerler, oldukça geniş uygulama alanına sahiptir. Geçirimli asfaltlar (yüksek boşluk oranı, düşük temas noktaları nedeniyle), yoğun gradasyonlu aşınma tabakaları, ince veya çok ince (1.5-4 cm) serilebilen aşınma tabakaları (sıcak karışım), soğuk karışımlar (emülsiyon halinde) ve su yalıtım sistemleri en sık kullanılan alanlardır.

Walkering ve Vank yapmış oldukları çalışmada, SBS ve EVA polimerleri ile modifiye edilmiş bitümler kullanmışlardır. Hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde 40°C ve 50°C’de statik ve dinamik sünme deneyleri ile tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Her iki sıcaklıkta yapılan sünme deneyleri arasında tatmin edici bir ilişki olduğu, dinamik sünme ve tekerlek izi deney sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir [43].

SBS katkı maddesinin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada SBS’in bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir [44].

Yapılan çalışmada stiren-butadien-stiren (SBS) içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özellikleri geleneksel metotlar, dinamik mekanik analizler (DMA) ve kiriş eğme reometresi kullanarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan her üç yöntemde de SBS’in bağlayıcı parametrelerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir [45].

Jion-Shiuh Chen ve ekibi yapmış olduğu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS kullanmış ve bağlayıcının morfolojik ve reolojik özelliklerini transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve dinamik kayma reometresi kullanarak araştırmışlardır. SBS içeriğinin artışı ile kopolimerin yavaş yavaş baskın faz olduğu belirlenmiştir. Polimer faz arttıkça DSR deneyinden elde edilen tekerlek izi parametresinin arttığı belirlenmiştir [46].

Orta ve yüksek sıcaklıklarda elastomer modifiye asfalt karışımların dinamik mekanik özelliklerinin irdelendiği bir çalışmada, SBS ve SEBS (stiren-etilen / butadien-stiren) olmak üzere iki tip elastomerik katkı maddesi üç farklı oranda kullanılmıştır. Polimer modifikasyonun yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşum direncini, orta sıcaklıklarda yorulma direncini artırmada etkili olduğu, SEBS'in bağlayıcının tekerlek izi direncini SBS'den daha fazla iyileştirdiği, bununla beraber SBS'in orta sıcaklıklarda bağlayıcının yorulma direncini iyileştirmede daha etkili olduğu belirlenmiştir [47].

Tığdemir ve Kalyoncuoğlu, SBS katkılı bitümlü sıcak karışımların plastik deformasyon davranışını incelemişlerdir. Aşınma tabakası dizaynına uygun olarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde dinamik plastik deformasyon deneyleri yapılarak SBS polimer ilavesinin plastik deformasyona olan etkileri incelenmiştir. Polimer yüzdesine bağlı olarak plastik deformasyon direncinde bir artış olduğu yani plastik deformasyon değerinin azaldığı görülmüştür [48].

Kumar ve ekibi yapmış olduğu çalışmada SBS ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanarak modifiye bitümler hazırlamışlardır. Bu modifiye bitümlerle hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanan deneyler sonucunda her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir [49].

Yılmaz ve Kök, bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada Tüpraş rafinesinden temin edilen 100/150 penetrasyonlu bitüme üç farklı oranda (%2, %4 ve %6) SBS ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçlarından, SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. Dinamik kayma reometresi (DSR) sonuçlarından artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanım parametresinin arttığı belirlenmiştir [50].

SBS'in 50/70 penetrasyonlu saf bitümle beş farklı oranda (%2, %3, %4, %5, %6) karıştırılarak modifiye bitümlerin elde edildiği bir çalışmada modifiye bitümlerin temel karakteristikleri geleneksel yöntemlerle tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle elde edilen BSK karışımlarının saf bitümle hazırlanan BSK ile mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar modifikasyonun saf bitümün

özelliklerini (penetrasyon, yumuşama noktası, PI) ve karışımın mekanik özelliklerini (Marshall ve ITS) iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmada SBS'in bitüm içerisindeki dağılım yüzdesi ve numunelerin morfolojisi floresan mikroskopuyla görüntülenmiştir. Düşük SBS içerikli polimer modifiye bitümlerde sürekli bir bitüm faz gözlenirken, yüksek SBS içerikli polimer modifiye bitümlerde sürekli bir polimer faz gözlenmiştir. Ayrıca SBS katkısının BSK'ların kısa ve uzun dönem yaşlanmalarını azalttığı sonucuna varılmıştır [51].

Elvaloy Ret kullanılarak inşa edilen ilk yol Oregon'da bulunmaktadır. 1991'den beri kullanımda olan, sürtünmeye karşı dirençli bir asfalttır. Uzun süredir dayanıklılık göstermektedir [41].

1999 yazında, Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi'nde (National Center for Asphalt Technology-NCAT) yüklü bir teker kullanarak modifiye edilmemiş asfaltlar ile polimer modifiyeli (PMA) asfaltlar içeren SHRP Superpave karışımları karşılaştırılmıştır. Tekerlek izi direnci ile ilgili verilerden, Elvaloy Ret ve SBS ile yapılan karışımların en üstün karışımlar olduğu sonucuna varılmıştır [41,42].

Mat Witczak tarafından, %0, %1.5 ve %2.0 Elvaloy Ret içeren Conoco asfaltıyla üretilmiş yoğun sınıf numuneler üzerine yerleştirilen yük sonucu yorulma direnci üzerine çalışma yapılmıştır. Elvaloy Ret ile modifiye olmayan asfalt 30 psi kompresif basınç altında 200 çevrim sonunda başarısızlık gösterirken, aynı numune %2.0 Elvaloy Ret ile modifiye edildiğinde testin durdurulduğu 10000 çevrime kadar bir zayıflama işareti görülmemiştir [52].

Maryland Üniversitesi'nde Billings tarafından Montana'dan elde edilen ve farklı seviyelerde Elvaloy Ret içeren Conoco asfaltı kullanılarak nem hasar testleri yapılmıştır. Bu çalışmada polimer kökenli olan SBS ve Elvaloy Ret kullanılmıştır. SBS modifiyeli numuneye göre Elvaloy Ret modifiyeli numuneler daha üstün sonuçlar göstermiştir [53].

Witczak ve Hafez, Elvaloy Ret kullanarak yaptıkları modifiye asfalt karışımın yolda uzun süre durabiliteyi sağladığını ve üstün performans sergilediğini yapmış oldukları çalışmadan elde ettikleri sonuçlardan görmüşlerdir [38].

Dupont ve Chevron'un 1990'lı yıllarda üretmeye başladıkları terpolimer, geliştirilerek binder tabakasında bitüm modifikasyonunda kullanılmaya başlanmıştır.

Elvaloy Ret, küçük bir miktar bitümde modifiyer katkı olarak kullanıldığında elastomerik özelliklerini geliştirdiği bu çalışmada görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda ve de ısıtılınca viskoelastik kıvamda olan ve yumuşak halde bulunan bu polimer düşük sıcaklıklarda katı hale geçmektedir [54].

Keyf ve Özen, bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmak ve üst yapının hizmet ömrünü artırmak amacıyla Elvaloy Ret ve Elvaloy AC bitüme ilave ederek yapmış oldukları çalışmada saf bitümlü bağlayıcıya göre penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktasının arttığı, düktilite değerinin azaldığı sonucuna varmıştır [55].

Güngör ve arkadaşları polimer modifiye bitümlerin Superpave performans sınıflarının belirlenmesi adı altındaki çalışmasında; Kırıkkale rafinerisine ait bitümlerde SBS katkılı modifiye bitümlerin düşük sıcaklık performansının genellikle bir sınıf azaldığını, Elvaloy Ret katkılı bitümlerde ise çok az bir azalma olduğu ve çoğunlukla ana bitüm sınıfıyla aynı performans sınıfı içerisinde kaldığı sonucuna varmıştır. Batman rafineri bitümünden SBS ve Elvaloy Ret katkı malzemesi ile üretilen modifiye bitümlerin performans sınıfının en az bir, çoğunlukla ise iki sınıf azaldığı yani düşük sıcaklık performansının kötüleştiğini tespit etmiştir [56].

Lavin, bitüm modifikasyonunda %1-2 oranda Elvaloy Ret kullanarak test bölgesi Gürcistan Ulaştırma Departmanında (GDOT) kaplamanın binder tabakasında uygulama yapmış ve Elvaloy Ret kullanımıyla Superpave karışım dizaynıyla hazırladığı modifiye karışımlarda performans sınıfı yüksek sıcaklık değerinde bir sınıf artma sağladığını tespit etmiştir. Böylelikle daha yüksek sıcaklığa sahip olan bölgelerde Elvaloy Ret kimyasal reaktörünün bitüm modifikasyonunda kullanım alanı artmıştır [57].

Katz çalışmasında, birçok elastomerin ve plastomerin aksine bitüme az bir oranda Elvaloy Terpolimerinin ilavesiyle hazırlanan modifiye karışımların 1991'den beri uzun dönem durabilitede mükemmel sonuçlar gösterdiğini ve yüksek trafik yükleri altında zor deforme olduğunu, tekerlek izi oluşumunu önemli ölçüde azalttığını ve sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğunu ifade etmiştir [58].

Yıldırım, polimer modifiye bağlayıcı üzerine yaptığı çalışmada SBR, SBS, Elvaloy ve kauçuk polimerlerini kullanmıştır. Bu polimerlerin özellikleriyle en uygun reolojik özellikli bağlayıcı tespit etmeye çalışmıştır. %0, %1.5 ve %2 oranlarda bitüme Elvaloy eklenmesiyle nem hasarında azalma sonucuna varmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta yapmış olduğu DSR deney sonuçlarından da daha iyi performans gösteren polimerin Elvaloy olduğunu tespit etmiştir. Elvaloy polimer katkısının bitümle kimyasal bağ kurarak ayrışmaması ve homojen dağılımını muhafaza edebiliyor olması; bu polimerin depolama, nakliye ve uygulamada tercih edilirliliğini artırmaktadır [59].

Ranjbaran ve arkadaşları su yalıtım örtüsü membran ile Elvaloy kullanmışlardır. Elvaloy ilavesiyle mekanik mukavemet artmıştır. Gaz ayırma testi sonuçlarında Elvaloy kullanımıyla CH₄/CO₂ geçirgenlik oranı azalmıştır, yani geçirgenliği reddetmiştir. Ayrıca %15 Elvaloy, %85 Toluen kullanım oranlarında çözüm döküm yöntemi kullanılarak su uzaklaştırılmıştır [60].

Kashif Ahmed ve arkadaşları tarafından, Marshall tokmağı ve döner yoğurmalı pres sıkıştırıcı ile hazırlanan 60/70, 80/100 penetrasyonlu saf bitüme ve %1.3 Elvaloy içeren polimer modifiye bitüme dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve esneklik modülü testleri uygulanmıştır. Optimum bitüm oranı %4.55 olan, Marshall tokmağı ile sıkıştırılan, %1.3 Elvaloy içeren polimer modifiye bitümlü karışımın dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve esneklik modülü testi sonuçları değerleri yüksek çıkmıştır. Bu çalışma neticesinde; Pakistan ağır trafik yükü şartları için yüksek sertlik ve düşük deformasyon özelliği nedeniyle yüksek sıcaklığa sahip bu bölgede Elvaloy katkısının kullanılabilirliği tavsiye edilmiştir [61].

Shirodkar ve arkadaşları, Amerika Birleşik Devletleri'nde artan trafik hacmine dayanabilen, ağır trafik yükleri altında zor deforme olan, yollarda artan lastik basınçlarına ve sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklı polimer modifiyerleri testlere tabi tutmuştur. Bunun için çalışmada farklı oranlarda Elvaloy ve SBS polimerleri katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Farklı gerilme seviyelerinde viskoelastik parametreler geri dönüşüm ve kayma eğrisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca istatistiksel analiz yapılarak test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylece polimer modifiye bitümün testler ve analiz sonuçlarıyla

lineer ve lineer olmayan mekanik davranışlarını nasıl etkilediği değerlendirilmiştir [62].

Topal tarafından, yüksek sıcaklıkta yapılmış olan DSR deney sonuçlarından Elvaloy polimeri kullanımında tekrarlanan yük altında deformasyonda belirgin bir azalma olduğu tespit edilmiştir [63].

Gonzales ve arkadaşları, çalışmada kalıcı deformasyona ve termal çatlak oluşumuna karşı direncini artırmak için polimerleri bitümde modifiyer olarak kullanmıştır. Kullanılan tüm polimerler kalıcı deformasyona ve termal çatlak oluşumuna karşı olan direnci artırmıştır [64].

Topal, İzmir Aliağa rafinerisinden temin ettiği B 50/70 penetrasyonlu bitüme; yüksek esnek plastomer EVA, kimyasal reaktif terpolimer Elvaloy Ret ve kopolimer Elvaloy 3427 farklı oranlarda ilave ederek geleneksel test yöntemlerine ve dönel viskozimetre deneyine tabi tutmuş, ayrıca florasan mikroskobu ile mikro yapı ve polimer morfolojisini incelemiştir. Çalışmasından düşük sıcaklık çatlaklarında ve kalıcı deformasyonda yüksek penetrasyon indeksine sahip olan karışımların daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Florasan mikroskobu ile baktığı mikro yapıların bitüme fiziksel olarak eklenen polimerlerde belirgin olarak görüldüğünü, ancak Elvaloy Ret kimyasal olarak bitümle reaksiyona girdiği için belirgin olarak görülmediği tespit edilmiştir. Bitüm koyu ve siyah iken, polimer ilave edilen modifiye bitüm açık ve beyaz fazda olduğu çalışmada görülmüştür. Buradan Elvaloy Ret gibi reaktif terpolimerin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi ve incelenmesi amacıyla kullanılabilir olmadığı sonucuna varılmıştır. Çünkü reaktör görevi gören bu polimer homojen olarak bitümle tek faz oluşturmuştur [63].

Sönmez ve Deniz, modifiye katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışıma etkisi ve performans üstünlükleri adlı çalışmasında plastomer, elastomer, doğal hidrokarbonlar, Trinidad göl asfaltı ve selülozik elyaf esaslı katkı maddelerinin BSK performans üzerindeki etkileri ve birbirine karşı üstünlüklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere göre katkı maddelerinin BSK'ya olumlu etkileri ve her birinin diğerine göre üstün yönleri ortaya konulmuştur. Genel değerlendirmeler neticesinde deneysel sonuçlardan tüm özellikleri dikkate alarak modifiye katkı maddeleri değişik özellikler göstermekle birlikte Olexobit, Gilsonite ve Elvaloy katkılarının genel bir üstünlüğü olduğu sonucuna varılmıştır [65].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, bir katkı maddesi olarak kullanılan Elvaloy Ret'in bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda bir modifiyer olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle deneylerde kullanılacak saf bitümlü bağlayıcının ve agreganın fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Üretici firmanın tavsiyeleri ve yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre saf bağlayıcıya ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında Elvaloy Ret ilave edilerek modifiye asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan saf ve modifiye bitümler geleneksel ve Superpave test yöntemlerine tabi tutularak fiziksel ve reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca saf ve modifiye bağlayıcılar, kısa ve uzun süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların yaşlandırma işleminden önceki ve sonraki özellikleri tespit edilmiştir. Seçilmiş olan agrega gradasyonuna göre saf bağlayıcı kullanılarak Marshall dizayn yöntemine göre optimum bitüm içeriği tespit edilmiştir. Bu optimum bitüm içeriğine göre farklı oranlarda hazırlanmış olan modifiye bitümlü bağlayıcılar kullanılarak yine Marshall dizayn yöntemine göre modifiye karışım numuneleri hazırlanmış ve performans deneylerine tabi tutulmuştur.

4.1. Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi

Tez çalışmasında bağlayıcı olarak Batman Tüpraş rafinerisinden temin edilen saf bitüm sınıfı B 100/150, diğer bir ifadeyle 100/150 penetrasyonlu bitüm bağlayıcı sınıfı kullanılmıştır. Kullanılan bitümlü bağlayıcının bazı fiziksel özellikleri geleneksel deneylerle tespit edilerek sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Saf bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	B 100/150	
		Sonuç	Şartname Sınırı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³), 25 °C	TS 1087	1,032	1,0-1,1
Düktilite (cm), 25 °C	TS 119	>100	min. 100
Penetrasyon (0,1 mm), 100gr, 5 sn, 25 °C	EN 1426	146,8	100-150
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	45,45	39-47
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,714	-
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	312	min. 230

4.2. Agregası Seçilmesi

Çalışmada, agregası malzemesi olarak Malatya Belediyesi'nden temin edilen kalker kökenli kırmataş malzeme kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının gradasyonu Tablo 4.2'de verilmiştir. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri de Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Agregası gradasyonu

Elek Boyutu (mm-no)	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,150	0,075
	(3/4")	(1/2")	(3/8")	(#4)	(#8)	(#16)	(#30)	(#50)	(#100)	(#200)
% Geçen	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5

Tablo 4.3. Agreganın fiziksel özellikleri

Deneyin Adı	Deney Standardı	Şartname Limiti / Ölçülen Değer
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM D 131	Maks. 30 / 28
Donma kaybı (%) (MgSO ₄)	ASTM C 88	Maks. 10 / 4,5
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D 4791	Maks. 10 / 4
Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm ³)	ASTM C 127	- / 2,648
Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı (g/cm ³)		- / 2,711
Kaba agreganın su absorpsiyonu (%)		Maks. 2 / 0,88
İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm ³)	ASTM C 128	- / 2,664
İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı (g/cm ³)		- / 2,750
İnce agreganın su absorpsiyonu (%)		Maks. 2 / 1,17
Fillerin zahiri özgül ağırlığı (g/cm ³)	ASTM D 854	- / 2,751

4.3. Kullanılacak Katkı Oranlarının Seçilmesi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada katkı malzemesi olarak bitüm modifikasyonunda kullanılmak üzere Dupont firmasından temin edilen bir polimer türü olan reaktif terpolimer Elvaloy Ret kullanılmıştır. Modifiye karışımda bitüme ilave edilerek kullanılan Elvaloy Ret polimer katkı malzemesinin genel özellikleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Elvaloy Ret polimerinin genel özellikleri [37]

Kompozisyon	Standart	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Doğrusal
Fiziksel Özellikleri		
Özgül ağırlık	ASTM D792	0,94
Fiziksel hali		Toz Tanecikli
Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)		0.557
Akış katsayısı (g/10min)	ASTM D-1238	8
Erime Noktası (°C)	ASTM D3418	72

Üretici firma Dupont tarafından bitüme %0-%2 oranlarda Elvaloy Ret polimer katkı ilavesi tavsiye edilmiştir. Ancak bu oran, kullanılan bağlayıcı bitüme ve deneysel çalışmalara göre belirlenir. Öncelikle saf bitüme %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarda Elvaloy Ret ilave ederek modifiye bitüm hazırlanmıştır. Ancak kimyasal olarak bitümle reaksiyona giren reaktif polimer katkı Elvaloy Ret; %1.5 ve %2.0 oranlarında bağlayıcı bitüm ile homojen dağılım göstermemiş olup, tek faz karışım oluşturmamıştır ve karışımın yüzeyinde topaklanma meydana getirmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılan katkı oranları olarak %1.5 ve % 2.0 kullanılamamıştır. Çalışmada kullanılmak üzere saf bitüme %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarda Elvaloy Ret ilave edilerek modifiye karışım hazırlanmıştır.

Saf bitüme belirlenen oranlarda (%0.5, %0.75 ve %1.0) Elvaloy Ret polimer katkısı ilave edilerek modifiye bitüm hazırlanma prosedürü aşağıdaki adımlar uygulanarak gerçekleştirilmiştir:

-Saf bitüm (B 100/150), yaklaşık 40 dakika sıvı-akışkan hale gelinceye kadar etüvde 165-175 °C’de ısıtılır.

-Isıtılan ve akışkan hale gelen saf bitümden 400-500 gr. alınarak, karıştırıcısına yerleştirilir ve karıştırma sıcaklığı olan 185 °C’ye gelene kadar karıştırıcısında bekletilir.

-Belirlenen oranlarda (%0.5, %0.75 ve %1.0) Elvaloy Ret polimer katkısı hesap edilerek tartılır ve hazırlanır.

-Karıştırıcı haznesine yerleştirilerek ve karıştırıcısı için ayarlamalar yapılarak hazırlanan Elvaloy Ret, saf bitüme 4-5 aşamada 2’şer dakika ara ile ilave edilerek karıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 4.1.a).

-Karıştırma işlemi 500 devir/dakika dönme hızıyla gerçekleşmektedir. Bu işlem 2 saat sürmektedir.

-Karışım katalizör olarak %0.2-%0.3 oranda süper fosforik asit enjekte edilerek 30dk. daha karıştırma işlemi devam eder (Şekil 4.1.b).

-Karışım homojen dağılım gösterdiğinde, deney başarılı kabul edilir ve 2 litrelik kaba bağlayıcı aktarılaraq ağzı sıkıca kapatılır ve etüve atılarak kür işlemine tabi tutulur.

-Kür işlemi 185 °C'deki etüvde 90 dakika sürer. İşlem sonunda hazırlanan bitümlü bağlayıcı diğer deneylerde kullanılmak üzere hazırdır.



(a)



(b)

Şekil 4.1 Bitüme Elvaloy Ret (a) ve süper fosforik asit ilavesi (b)

Karıştırma işleminde kullanılan karıştırıcı mikseri ve dört bıçaklı karıştırıcı aparatı Şekil 4.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2 Modifiye bitüm mikseri (a) ve karıştırma başlığı (b)

Karıştırma aşamasında kullanılan modifiye bitüm hazırlama prosedürü, bütün oranlarda aynı şartlarda uygulanarak, deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir. Böylece tüm modifiye bağlayıcılar eşit şartlarda ve aynı adımlar uygulanarak hazırlanmıştır.

4.4. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

Hazırlanmış olan saf ve modifiye bağlayıcılar yaşlandırma işlemine tabi tutularak, kütle kayıpları tespit edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların bazı fiziksel özellikleri geleneksel test yöntemleriyle belirlenmiştir. Daha sonra saf ve modifiye bağlayıcılar yeni test yöntemlerine tabi tutularak deneysel sonuçlar belirlenmiştir. Bağlayıcılar üzerinde uygulanan deney sonuçları alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.4.1. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılması

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla bağlayıcılar, Şekil 4.3'te görülen Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı (RTFOT) deney cihazı kullanılarak yaşlandırılmıştır.



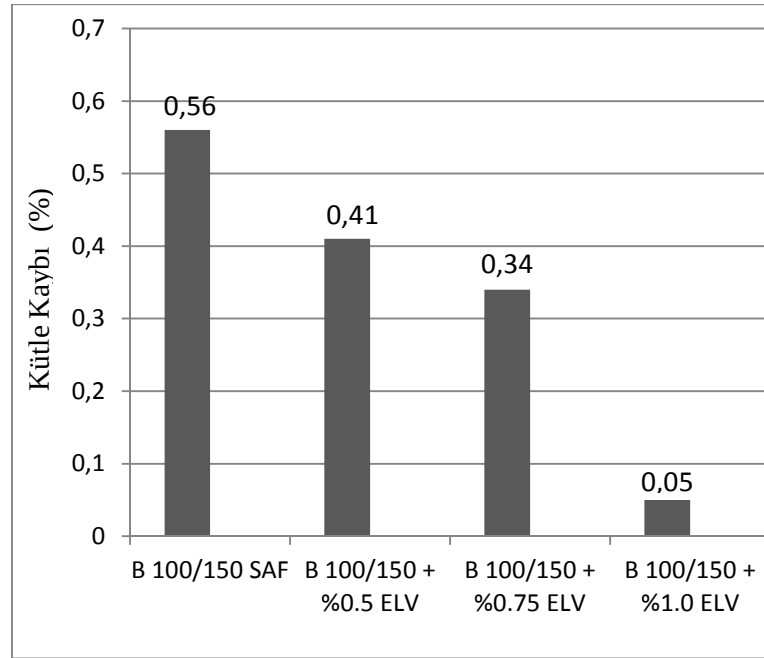
Şekil 4.3 RTFOT yaşlandırma deney cihazı

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılar ayrı ayrı 150 °C sıcaklıkta ısıtılarak, 8 adet özel deney şişesinin her birinin içine 0,01 gram hassasiyetle tartılmış yaklaşık $35 \pm 0,5$ gram saf bitüm ve bitümlü bağlayıcı numuneleri doldurularak 163 °C'ye kadar ısıtılmış RTFOT etüvünün dönen tablası üzerine yerleştirilmiş ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülerek deney yapılmıştır. Deney sonucunda, şişelerdeki numunelerin bir kısmı saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların kütle kaybının tespiti için kullanılmış, diğerleri ise bağlayıcıların performans deneyleri için ayrı bir kaba aktarılarak saklanmıştır. Tablo 4.5'te saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.5. Bağlayıcıların kütle kaybı sonuçları

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B 100/150 SAF		B 100/150 + %0.5 ELV		B 100/150 + %0.75 ELV		B 100/150 + %1.0 ELV	
Deney No		1	2	1	2	1	2	1	2
Boş Ağırlık		160	160,5	160	155,6	155,1	155,6	162,8	165
İlk Kütle, M1 (gr)		195	195,4	195,4	190,5	189,9	190,8	198,2	199,8
Son Kütle, M2 (gr)		194,1	194,1	194,6	189,7	189,3	190,1	198,1	199,7
<u>Kütle Kaybı (%) =</u> <u>100 (M1-M2)/M1</u>	maks.0,8	0,462	0,665	0,409	0,420	0,316	0,367	0,05	0,05

Bağlayıcıların kütle kaybı (%) sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Bağlayıcıların kütle kaybı sonuçları

Şekil 4.4 incelendiğinde; elde edilen sonuçlardan, Elvaloy Ret oranı arttıkça kütle kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir. B 100/150 saf bitümlü bağlayıcıya göre Elvaloy Ret modifiye bitümlü bağlayıcıların (%0.5, %0.75, %1.0) kütle kaybı sonuçlarının sırasıyla yaklaşık %26.8, %39.3 ve %91.1’lik bir azalma göstermiştir.

Bağlayıcılarda Elvaloy Ret’in modifiye katkı olarak kullanılması ile kaplamalarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olan bağlayıcı sertleşmesinin olumsuz etkilerinin ortadan kalktığı, dolayısıyla bağlayıcının elastikiyetinde bir azalma olmadığı görülmüştür.

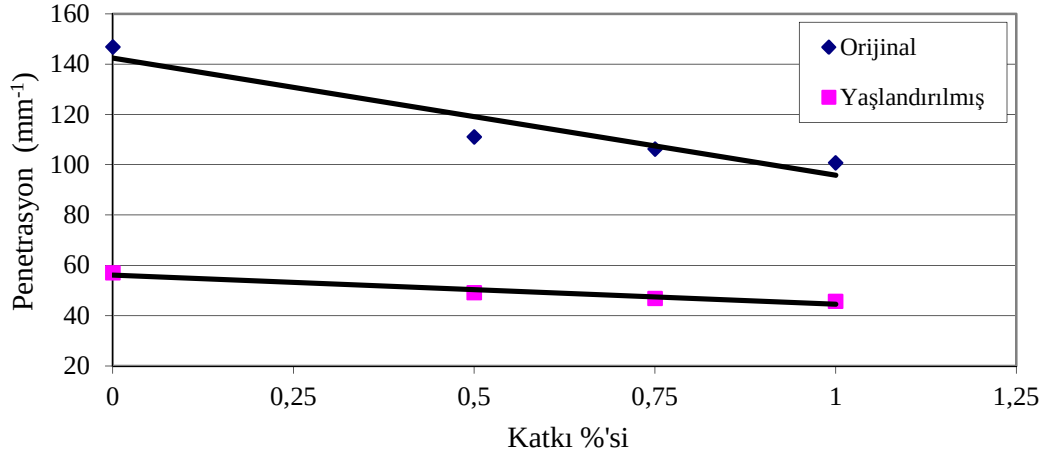
4.4.2. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve Elvaloy Ret katkılı modifiye bitümlü bağlayıcılar üzerinde ve RTFOT deneyi ile yaşlandırılmış olan saf ve modifiye bağlayıcı kalıntılarına fiziksel özelliklerini tespit etmek için penetrasyon deneyleri uygulanmıştır. Bu uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları

Orijinal Saf ve Modifiye Bağlayıcılar İçin Sonuçlar				
Bağlayıcı Türü	Deney No-Sonuçlar			Penetrasyon
	1	2	3	
B 100/150	152,5	148,2	139,8	146,8
B 100/150 + %0.5 ELV	111	111,1	111,2	111,1
B 100/150 + %0.75 ELV	105,8	105,6	107,3	106,2
B 100/150 + %1.0 ELV	102	100,5	100	100,8
RTFOT ile Yaşlandırılmış Saf ve Modifiye Bağlayıcılar İçin Sonuçlar				
B 100/150	56,1	58,1	56,6	56,9
B 100/150 + %0.5 ELV	47,9	51,6	48	49,1
B 100/150 + %0.75 ELV	48,3	45,5	46,5	46,7
B 100/150 + %1.0 ELV	45,4	46,9	44,6	45,6

Tablo 4.6 incelendiğinde; orijinal numunelerde saf bağlayıcı bitüme %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarda Elvaloy Ret polimer katkı ilave edilmesiyle hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçlarının saf bitümlü bağlayıcı deney sonuçlarına göre sırasıyla yaklaşık %24.3, %27.7 ve %31.3 azaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış numunelerde ise; sırasıyla yaklaşık %13.7, %17.9 ve %19.8’lik bir azalma görülmüştür. Şekil 4.5’te saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin katkı %’si ile penetrasyon değerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.5 Penetrasyon-katkı %'si değişimi

Şekil 4.5 incelendiğinde; modifiye bitümlü bağlayıcılardaki Elvaloy Ret katkı oranının arttıkça penetrasyon değerlerinin azaldığı, yani Elvaloy Ret'in bağlayıcıyı daha sert kıvama getirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca; penetrasyon değerlerindeki azalmaya bağlı olarak modifiye edilmiş bitümlerin daha sert kıvama gelmesiyle sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin azalabileceği ve sıcak bölgelerde daha uzun kullanım ömrüne sahip olabileceği görülmüştür.

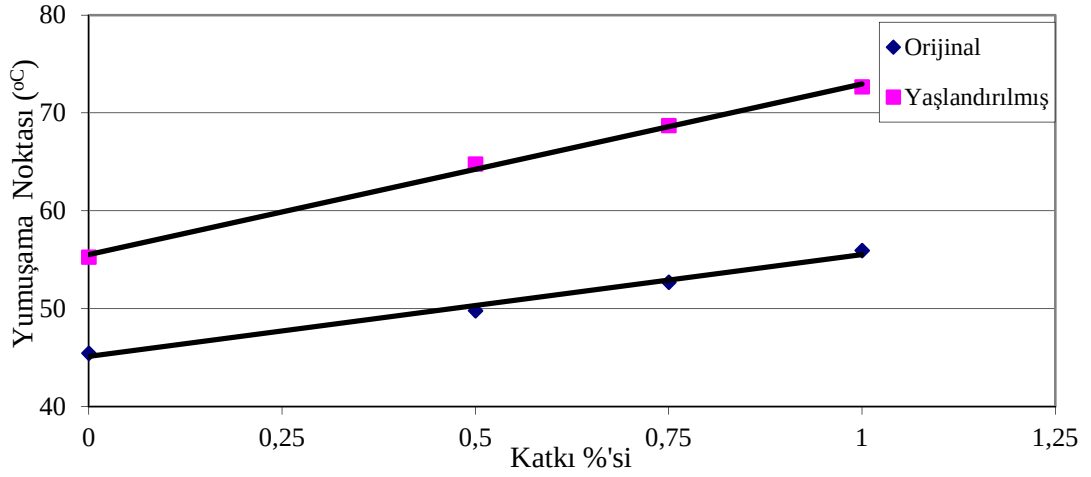
4.4.3. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve Elvaloy Ret katkılı modifiye bitümlü bağlayıcılar üzerinde ve RTFOT deneyi ile yaşlandırılmış olan saf ve modifiye bağlayıcı kalıntılarına fiziksel özelliklerini tespit etmek için yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Bu uygulanan deneylere ait sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Bağlayıcıların Yumuşama Noktası deney sonuçları

Orijinal Saf ve Modifiye Bağlayıcılar İçin Sonuçlar (°C)			
Bağlayıcı Türü	Deney Sonuçları (°C)		Yumuşama Noktası
	1	2	
B 100/150	45,3	45,6	45,45
B 100/150 + %0.5 ELV	49,5	50,1	49,80
B 100/150 + %0.75 ELV	52,5	52,9	52,70
B 100/150 + %1.0ELV	56,3	55,6	55,95
RTFOT ile Yaşlandırılmış Saf ve Modifiye Bağlayıcılar İçin Sonuçlar (°C)			
B 100/150	55,3	55,2	55,25
B 100/150 + %0.5 ELV	64,3	65,2	64,75
B 100/150 + %0.75 ELV	68,5	68,9	68,70
B 100/150 + %1.0ELV	72,4	72,9	72,65

Tablo 4.7 incelendiğinde; saf bağlayıcı bitüme %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarda Elvaloy Ret polimer katkı ilave edilmesiyle hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçlarının, saf bitümlü bağlayıcı deney sonuçlarına göre orijinal numunelerde sırasıyla yaklaşık %9.6, %15.9 ve %23.1 artış görülmüştür. Yaşlandırılmış numunelerde ise; sırasıyla %17.2, %24.3 ve %31.5'lik bir artış görülmüştür. Şekil 4.6'da saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin katkı %'si ile yumuşama noktası değerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.6 Yumuşama noktası-katkı %'si değişimi

Şekil 4.6 incelendiğinde; kullanılan Elvaloy Ret katkı oranı arttıkça yumuşama noktası değerlerinin de hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılarda arttığı görülmektedir. Dolayısıyla; Elvaloy Ret oranının artması, bağlayıcının yüksek sıcaklıkta daha rijit davranış sergileyeceğini göstermektedir. Bu nedenle bağlayıcıların daha katı duruma geldikleri ve bu özellikleri ile daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecekleri görülmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 4.1-4.2). Formüldeki P_{25} , bitümün 25 °C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası değerini göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [66].

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (4.1)$$

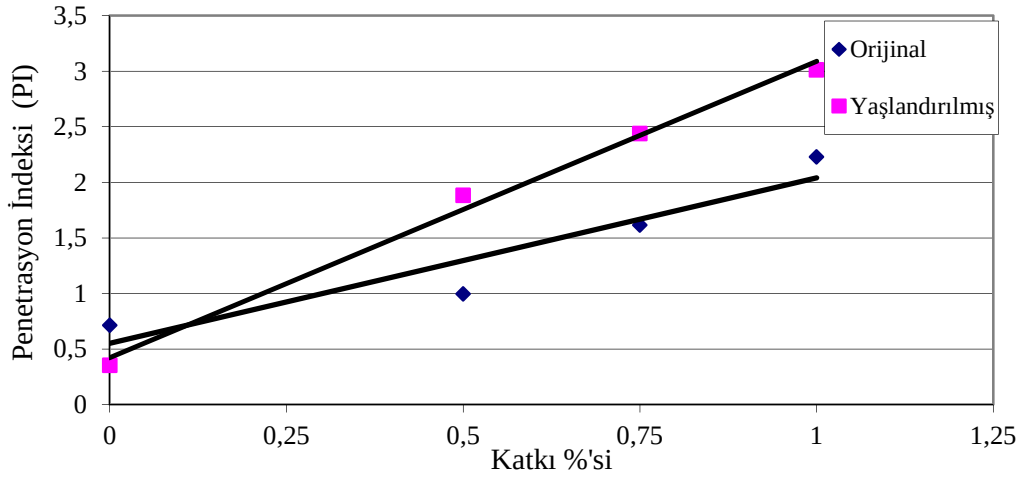
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Saf ve modifiye bitümlü orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların PI değerleri Formül 4.1 ve 4.2 kullanılarak hesaplanmış olup Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Saf ve modifiye bağlayıcıların Penetrasyon indeksi (PI) değerleri

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI) Değerleri	
	Orijinal	Yaşlandırılmış
B 100/150	0,714	0,354
B 100/150 + %0.5 ELV	0,995	1,883
B 100/150 + %0.75 ELV	1,615	2,439
B 100/150 + %1.0 ELV	2,228	3,012

Bitüm içeriğindeki Elvaloy Ret oranı arttıkça penetrasyon indeksinin orijinal bağlayıcılarda sırasıyla yaklaşık 1.4, 2.3, 3.1 kat artış sergilediği ve yaşlandırılmış bağlayıcılarda da 5.3, 6.9, 8.5 kat artış sergilediği Tablo 4.8’de görülmektedir. Şekil 4.7’de saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin katkı %’si ile penetrasyon indeksi (PI) değerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7 Penetrasyon indeksi (PI) -katkı %'si değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde; bağlayıcıların PI değeri, hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılarda katkı oranı arttıkça artış gösterdiği görülmektedir. Bu artış, Elvaloy Ret kullanılmasıyla bağlayıcıların daha sert bir kıvama geldiğini ve daha yüksek ve düşük sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayrıca bu özellik ile kaplamalarda karşılaşılan tekerlek izi ve kuma gibi daha çok sıcaklığa bağlı bozulmaların önlenmesi mümkün olabilecektir.

Saf ve modifiye bağlayıcıların uzun süreli yaşlandırılması için, RTFOT deneyi ile kısa süreli yaşlandırılmış olan bağlayıcılar PAV deneyine tabi tutulmuştur. Deneyde, RTFOT kalıntısı saf ve modifiye bağlayıcılar 100 °C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç altında yaşlandırılmıştır. Yaşlandırılmamış saf ve modifiye bağlayıcılar ile RTFOT ile kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar ve PAV ile uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcılar performans deneylerine tabi tutulmuşlardır.

4.4.4. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcıların yapımından hemen sonraki yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarındaki yorulma çatlak oluşumuna karşı dayanımları belirlenmektedir.

Bu amaçla ilk olarak yaşlandırılmamış (orijinal) saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık özellikleri belirlenmiştir. Her iki durumda bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenerek, bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi oluşumuna karşı gösterdikleri dirençler belirlenmiş ve yüksek sıcaklık performans seviyeleri tespit edilmiştir.

Son olarak bağlayıcıların orta servis sıcaklıklarındaki yorulma çatlak dayanımını belirlemek amacıyla PAV ile yaşlandırılmış saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenerek, bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma çatlak parametresi olan $G^*.\sin\delta$ faktörü bulunarak Superpave şartname kriterleriyle kıyaslanmış ve uygunlukları araştırılmıştır.

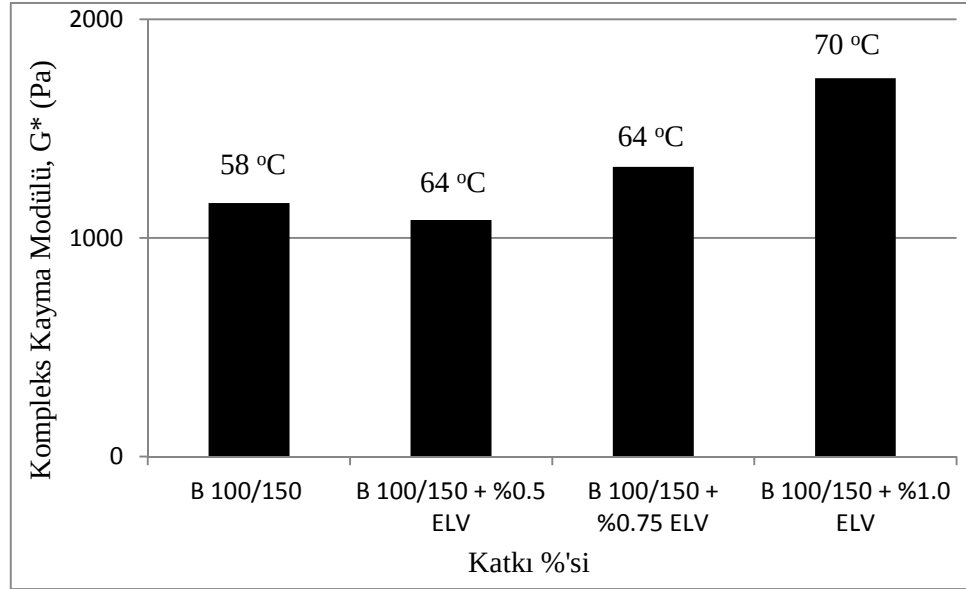
Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine uygulanan orijinal, RTFOT deney kalıntısı ve PAV deney kalıntısı numunelerine yapılan DSR deney sonuçları Tablo 4.9'da verilmiştir. Tabloda saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların deney yapılan sıcaklıklarda G^* , δ , $G^*/\sin\delta$ ve $G^*.\sin\delta$ değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Bağlayıcıların DSR deney sonuçları

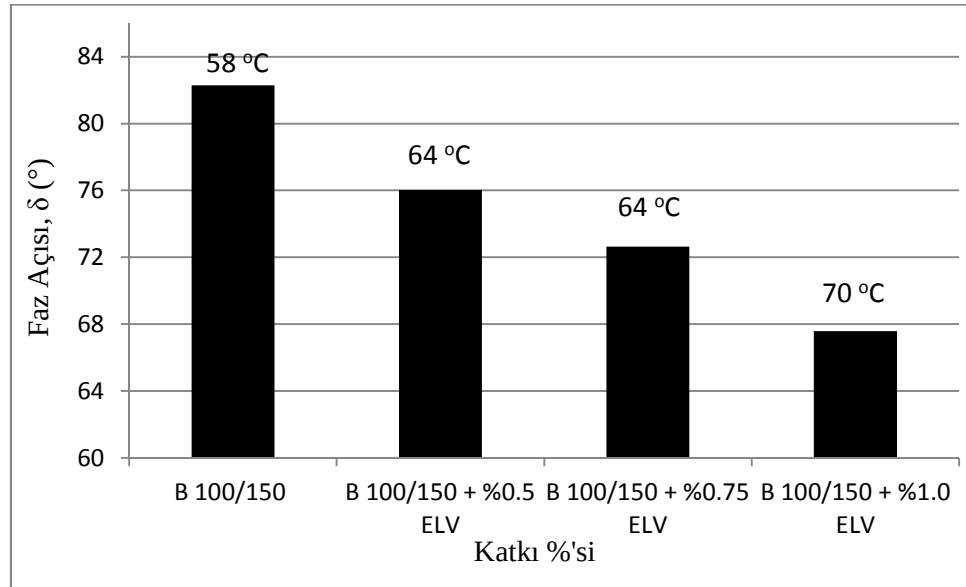
Sıcaklık (°C)	B 100/150	B 100/150 + %0.5 ELV	B 100/150 + %0.75 ELV	B 100/150 + %1.0 ELV
G* (Pa)				
52	2439,9	4052,57		6047,61
58	1160,8	2063,94	2409,9	3262,66
64	557,88	1083,24	1326,1	1730,47
70		573,7	727,76	996,64
76				556,2
δ (°)				
52	79,85	71,29		64,32
58	82,3	73,6	70,52	65,76
64	84,15	76,04	72,66	67,61
70		78,42	75,22	70,11
76				72,99
G*/sinδ (Pa)				
52	2478,69	4278,78		6710,54
58	1171,36	2151,44	2556,22	3578,17
64	560,801	1116,19	1389,24	1871,62
70		585,7	752,66	1059,86
76				581,66
G*/sinδ (Pa) RTFOT kalıntısı				
58	7698			
64		7408	9745	
70				8337
G*.sinδ (Pa.10³) PAV kalıntısı				
19	523	829		
22	388	634		
25		473	504	449
28			386	347,7

Tablo 4.9'daki verilere göre, Elvaloy Ret katkılı orijinal bağlayıcıların örneğin 64 °C sıcaklıktaki deney sonuçları değerlendirildiğinde; orijinal B 100/150 saf bağlayıcıya göre orijinal Elvaloy Ret katkılı bağlayıcıların (%0.5, 0.75, 1.0) tekerlek izi parametrelerinin sırasıyla yaklaşık %99, %148 ve %234'lük bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle Elvaloy Ret ilave edilerek hazırlanan modifiye bağlayıcılarda, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, tekerlek izine karşı dayanımının önemli ölçüde arttığını ve sonuç olarak, bağlayıcının daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabileceğini ifade etmek mümkündür.

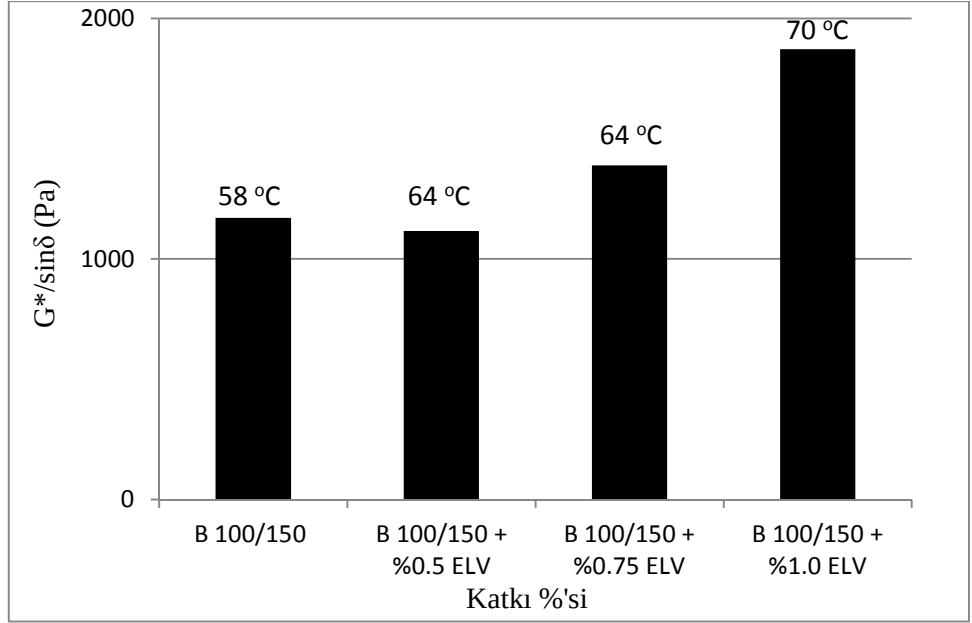
Orijinal saf ve modifiye bağlayıcıların tekerlek izi parametresinin şartname limitini (min. 1000 Pa) sağladıkları DSR deney sonuçlarına göre; kompleks kayma modülünün (G^*), katkı içeriğine göre değişimi Şekil 4.8’de, faz açısının (δ) değişimi Şekil 4.9’da ve tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.8 Kompleks kayma modülü (G^*)- katkı içeriği

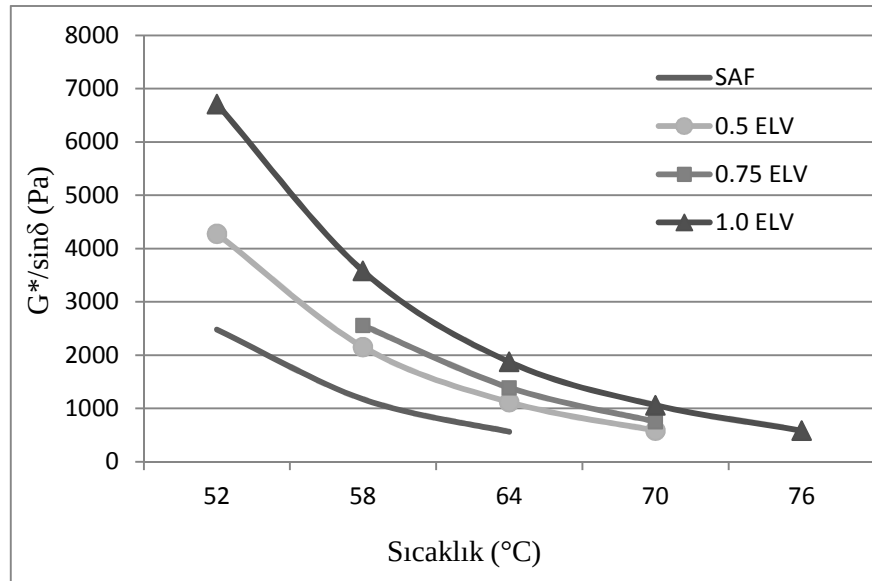


Şekil 4.9 Faz açısı (δ)- katkı içeriği



Şekil 4.10 Tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$)- katkı içeriği

Orijinal saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$), sıcaklık ile ilişkisi Şekil 4.11’de grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$)- sıcaklık (°C) ilişkisi

Şekil 4.8 incelendiğinde, malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olan kompleks kayma modülü (G^*) değerinin bağlayıcılarda Elvaloy Ret katkı miktarının artmasıyla önemli bir artış gösterdiği görülmektedir.

Faz açıları (δ) değerlendirildiğinde; katkı miktarının artmasıyla birlikte faz açılarında düşüş meydana geldiği dolayısıyla modifiye bağlayıcıların Elvaloy Ret miktarının artmasıyla birlikte daha elastik bir katı gibi davrandıkları görülmektedir (Şekil 4.9). Bu tespitler neticesinde, bağlayıcılara Elvaloy Ret ilave edilmesiyle bağlayıcıların deformasyonlara karşı göstermiş olduğu dirençte büyük artışlar meydana gelirken aynı zamanda bağlayıcının elastiklik özelliğinin de arttığı görülmektedir.

DSR deneyi ile saf ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki performans seviyeleri belirlenmiştir. Yaşlandırılmamış (orijinal) saf bitüm ve %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarda Elvaloy Ret polimer katkı içeren modifiye bitümlere uygulanan deneylere ait sonuçlar ve performans seviyeleri Tablo 4.10'da birlikte verilmiştir.

Tablo 4.10. Orijinal bağlayıcıların DSR deney sonuçları ve performans seviyeleri

Bağlayıcı Türü	G*/sinδ (Şartname limiti min. 1000 Pa)					Performans Seviyesi
	Sıcaklık, (°C)					
	52	58	64	70	76	
B 100/150	2478,69	1171,36	560,801			PG 58
B 100/150 + %0.5 ELV	4278,78	2151,44	1116,19	585,7		PG 64
B 100/150 + %0.75 ELV		2556,22	1389,24	752,664		PG 64
B 100/150 + %1.0 ELV	6710,54	3578,17	1871,62	1059,86	581,66	PG 70

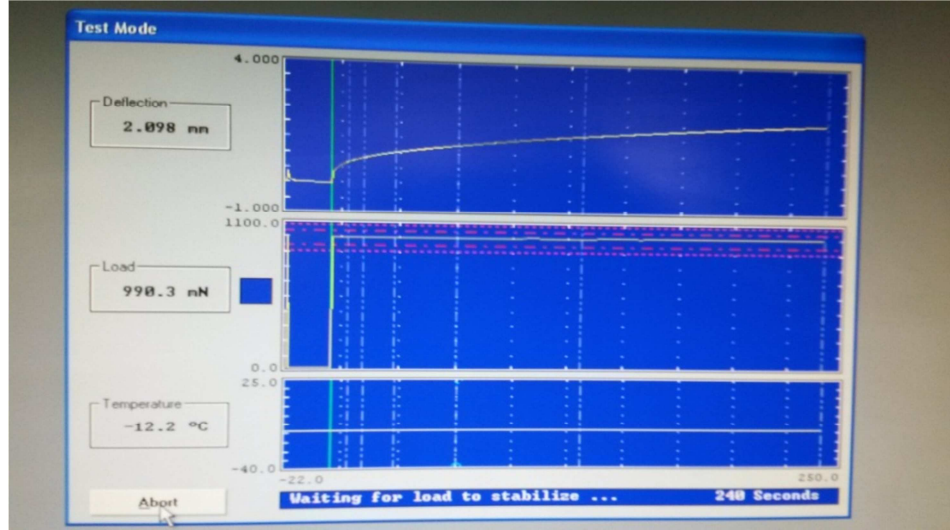
Tablo 4.10'da görüldüğü üzere, uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının ($G^*/\sin\delta$) tekerlek izi parametresinin 58 °C sıcaklıkta, %0.5 ve %0.75 oranda Elvaloy Ret ile hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcıların 64 °C sıcaklıkta ve %1.0 oranda katkı içeren modifiye bitümlü bağlayıcının da 70 °C sıcaklıkta şartname

limiti değeri olan 1000 Pa değerini sağladıkları tespit edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyeleri sırasıyla PG58, PG64, PG64 ve PG70 olarak belirlenmiştir. Buna göre Elvaloy Ret katkı kullanımı ile yüksek sıcaklık performans seviyelerinin artış gösterdiği görülmüştür. Bu artış; %0.5 ve %0.75 oranda Elvaloy Ret katkı içeren modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans derecesinde bir sınıf (6 °C), %1.0 oranda Elvaloy Ret katkı içeren modifiye bağlayıcılarda da iki sınıf (12 °C) kadar olmuştur. Bu sonuçlardan yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncinde iyileşme olduğu, dolayısıyla daha yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmektedir.

Bağlayıcıların yorulma çatlağı dayanımını belirlemek amacıyla da; saf bitümlü bağlayıcının PAV deney kalıntısı üzerinde 19 °C ve 22 °C sıcaklıklarda, %0.5 oranında Elvaloy Ret içeren modifiye bitümlü bağlayıcının PAV deney kalıntısı üzerinde 19, 22 ve 25 °C sıcaklıklarda ve %0.75 ile %1.0 oranlarında Elvaloy Ret içeren modifiye bitümlü bağlayıcının PAV deney kalıntısı üzerinde 25 ve 28 °C sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucunda PAV deney kalıntılarının hepsinin $G^* \cdot \sin \delta$ şartname limiti (maks. 5000 kPa) şartını sağladığı görülmüştür. Bu sağlanan değerler; bağlayıcının elastik olmasını yani yorulma direncinin yüksek olacağını ifade etmektedir.

4.4.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları

Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyi; saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların PAV deney kalıntıları üzerine, düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı gösterdiği direnci tespit etmek amacıyla uygulanmıştır. Saf ve modifiye edilmiş ve de yaşlandırılmış olan bitümlü bağlayıcılar 140 °C sıcaklıkta alüminyum kalıplara doldurulmuştur. Soğuyan numuneler, kalıplardan çıkartılarak BBR aletinin sıvı banyosunda 1 saat deney sıcaklığında (-16, -22 ve -28 °C) koşullandırılmıştır. Deney için asfalt kiriş numunesi cihazın mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatılmış ve toplam 240 saniye süreyle kirişe 980 ± 5 mN (100 ± 5 gr) yük uygulanmıştır. Deney esnasında uygulanan 980 mN'luk yükün etkisiyle kirişte meydana gelen defleksiyon, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik halinde çizilmiştir (Şekil 4.12) .



Şekil 4.12 BBR kirişinde oluşan defleksiyonun zamanla değişim grafiği

Ayrıca, sistem yazılımı tarafından 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kaldırılmış ve sünme sertliği ile sünme oranı hesaplanmıştır. Şekil 4.13'te bir deneme numunesinin deney sonundaki ekran görüntüsü verilmiştir.

Test Summary Report

Start Time: 24-Dec-2014 at 11:32:05
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: MxtSAF
 Specimen Number: 01
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.70 mm x 6.35 mm
 File Name: MxtSAF.S01

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	23.6	0.0000	---	---	---	---
0.5	892.4	0.0015	---	---	---	---
8.0	988.1	0.2261	356.6151	353.9500	-0.747343	0.546727
15.0	988.0	0.3221	250.2173	253.0423	1.129019	0.521024
30.0	988.6	0.4545	177.4512	178.0800	0.354321	0.492682
60.0	988.3	0.6220	128.5891	127.8112	-0.604962	0.464840
120.0	988.0	0.8560	94.1693	93.5523	-0.655198	0.435998
240.0	986.1	1.1582	69.4602	69.8348	0.539365	0.407656
250.0	22.2	0.6256	---	---	---	---

Print Exit

Şekil 4.13 BBR deney sonu ekran görüntüsü

BBR deneyi uygulanmış saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların deneyden sonraki görüntüsü Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 BBR deneyi uygulanmış deney numuneleri

BBR deneyi -16, -22 ve -28 °C sıcaklıklarda saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılara uygulanmıştır. Tablo 4.11’de saf bitüme ve modifiye bitümlü bağlayıcılara uygulanan BBR deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.11. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	Sünme Sertliği (Mpa) (Maksimum 300 Mpa)	m-Değeri (Minumum 0.300)
B 100/150	-16	88,031	0,326
	-22	158,374	0,315
	-28	379,012	0,288
B 100/150 + %0.5 ELV	-16	105,576	0,397
	-22	232,872	0,357
	-28	460,193	0,261
B 100/150 + %0.75 ELV	-16	136,977	0,371
	-22	305,986	0,293
	-28	-	-
B 100/150 + %1.0 ELV	-16	175,574	0,345
	-22	370,785	0,260
	-28	-	-

Deney sonucunda saf ve %0.5 oranında Elvaloy Ret polimer katkı içeren bitümlü bağlayıcılarının -22 °C sıcaklıkta, %0.75 ve %1.0 oranlarında Elvaloy Ret polimer katkı içeren bitümlü bağlayıcılarının da -16 °C sıcaklıklarda şartname limiti (min. 0.300) m-değerini ve şartname limiti (maks.300 MPa) sünme sertliği değerini sağladığı belirlenmiştir. Buna göre saf ve modifiye bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyeleri sırasıyla -22, -22, -16 ve -16 °C olarak belirlenmiştir.

Superpave bağlayıcı şartnamesine göre, bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performans seviyeleri birlikte değerlendirildiğinde, performans sınıflarının sırasıyla PG58-22, PG64-22, PG64-16 ve PG 70-16 olduğu tespit edilmiştir.

Bu veriler dikkate alındığında; bağlayıcının düşük sıcaklık performansı üzerinde Elvaloy Ret katkı kullanılması durumunda bağlayıcı rijitliğinin artmasında etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca daha yüksek sıcaklıkların hüküm sürdüğü bölgelerde PG70-16 performans derecesi ile %1.0 Elvaloy Ret katkılı modifiye bağlayıcıların kullanılabileceği görülmektedir.

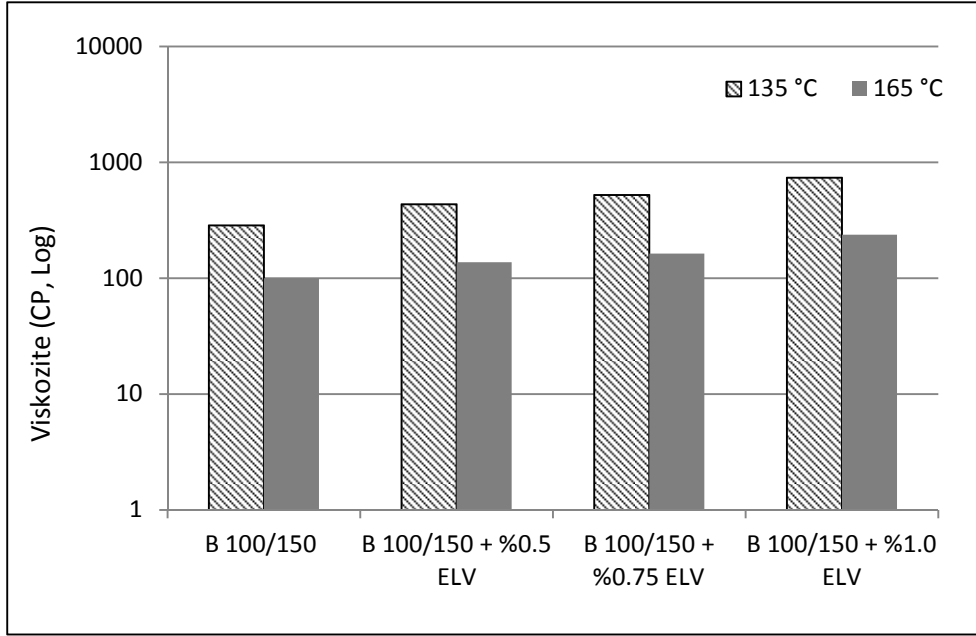
4.4.6. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümler üzerinde uygulanarak; karışım tasarımında kullanılacak bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla bağlayıcılar 135 ve 165 °C sıcaklıklarda deneye tabi tutulmuşlardır. Bunun için numuneler 140 °C ısıtılarak viskozimetre kabına yaklaşık 11 gr. dökülmüş ve kap viskozimetreye yerleştirilmiştir. Deney sıcaklığına gelen viskozimetre sıfırlandıktan sonra, no:27 silindirik mili cihaza takılarak dönme hızı 20 devir/dakika (20 rpm.) hıza ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. Deney sırasında sistem tarafından otomatik olarak saptanan viskozite değeri, numune sıcaklığı dengeli bir duruma geldikçe sabitleşmeye başlar. Bu şekilde saf ve modifiye bağlayıcıların deney sonuçları kaydedilmiş ve viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar ile modifikasyon indeks değerleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12. Bağlayıcıların RV deney sonuçları

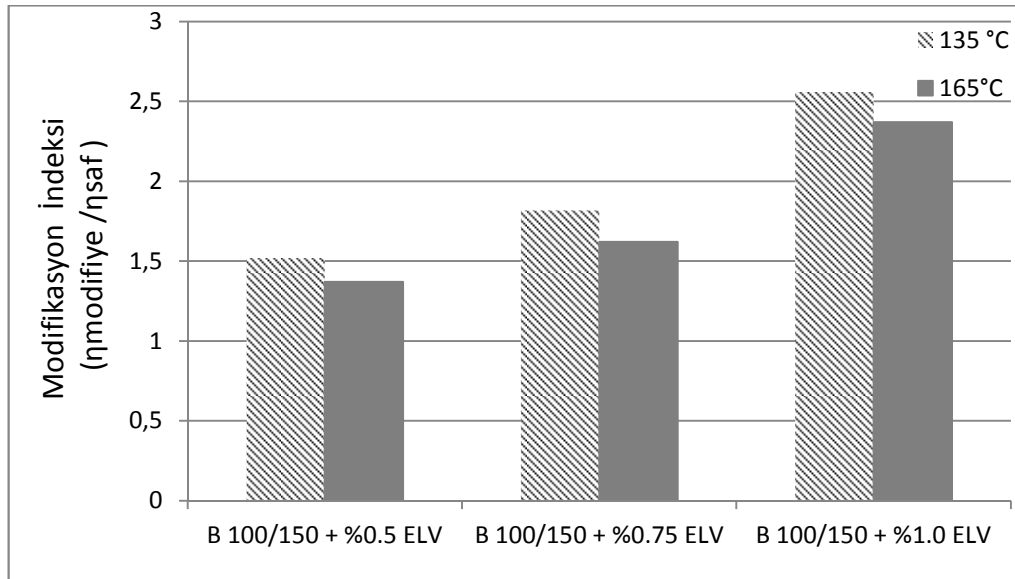
Özellik	Standart	B 100/150	B 100/150 + %0.5 ELV	B 100/150 + %0.75 ELV	B 100/150 + %1.0 ELV
Viskozite (cP, 135 °C)	ASTM D4402	287,5	437,5	525	737,5
Viskozite (cP, 165 °C)		100	137,5	162,5	237,5
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}}/\eta_{\text{saf}}$, 135°C)		1	1,52	1,82	2,56
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}}/\eta_{\text{saf}}$, 165°C)		1	1,37	1,62	2,37

Saf bitüme Elvaloy Ret polimer katkı ilavesi ile hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcılarda hem 135 °C sıcaklıkta hem de 165 °C sıcaklıkta katkı oranı arttıkça viskozite değerleri buna paralel olarak artış göstermiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Bağlayıcıların viskozite değerleri

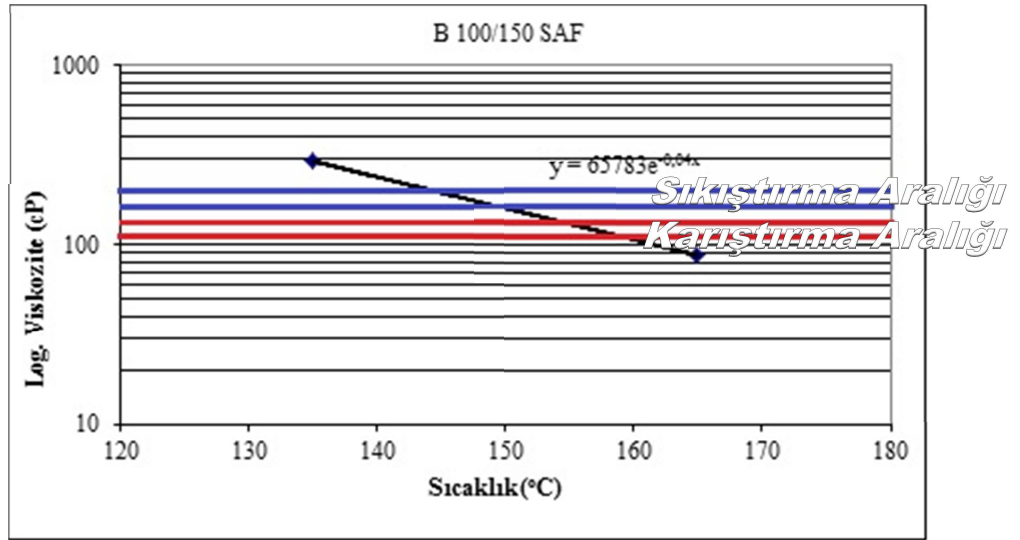
Modifiye bitümlü bağlayıcıların viskozite değerlerinin saf bitümlü bağlayıcının viskozite değerine oranlaması ile tespit edilen modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$) değerleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16 Bağlayıcıların viskozite modifikasyon indeksleri

Modifikasyon indeksi değerleri incelendiğinde, her iki sıcaklık değerinde de viskozite değerinin Elvaloy Ret katkı kullanım oranının artması ile paralel olarak ciddi bir artış gösterdiği görülmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların plentte agrega ile karıştırılırken ve bitümlü sıcak karışımların arazide sıkıştırılırken yeterli işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcıların 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [15]. Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Örnek olarak saf bağlayıcı bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir.



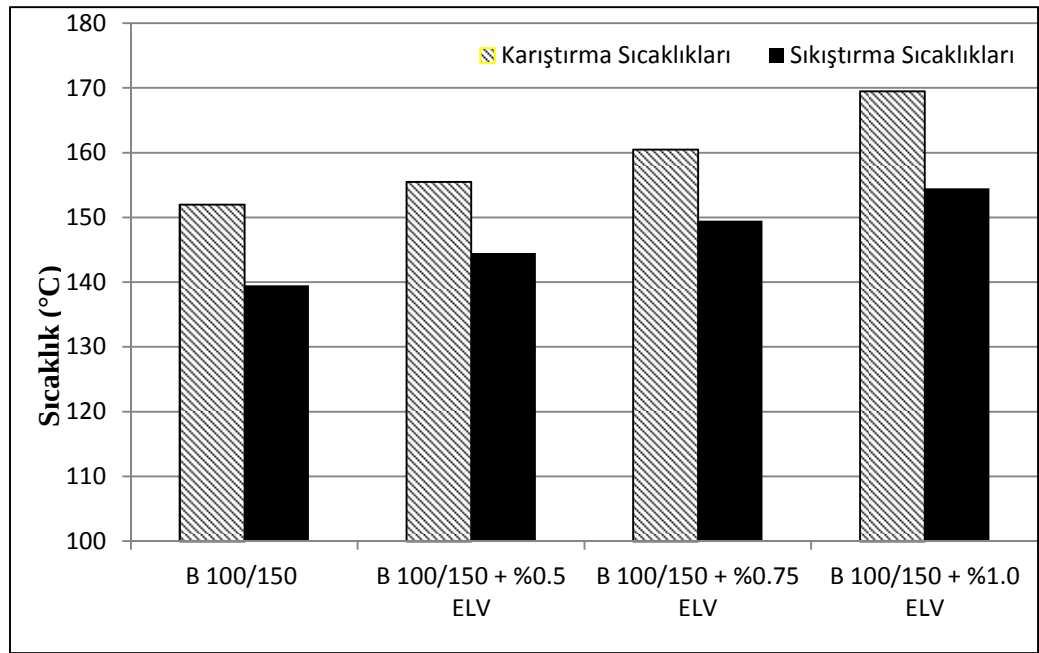
Şekil 4.17 Saf bağlayıcının karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiklerinden yararlanılarak tespit edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları ile ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13. Saf ve modifiye bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı Türü	Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
B 100/150	149-155	136-143	152	139,5
B 100/150 + %0.5 ELV	153-158	141-148	155,5	144,5
B 100/150 + %0.75 ELV	158-163	146-153	160,5	149,5
B 100/150 + %1.0 ELV	167-172	151-158	169,5	154,5

Tablo 4.13'te verilen saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının katkı miktarı ile değişimi de Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri

Şekil 4.18'deki veriler incelendiğinde B 100/150 saf bağlayıcı için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla 152 ve 139,5 °C olarak belirlenmiştir. Ancak, B 100/150 saf bağlayıcı bitüme artan oranlarda (%0.5, 0.75, 1.0) Elvaloy Ret ilave edilmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıklarında B 100/150 saf bağlayıcısına göre yaklaşık olarak sırasıyla %2.3, %5.6 ve %11.5; sıkıştırma

sıcaklıklarında ise yaklaşık sırasıyla %3.6, %7.2 ve %10.8 oranında bir artış meydana geldiği görülmektedir.

Tüm bu verilere göre, bağlayıcıya Elvaloy Ret ilave edilmesiyle katkı miktarına bağlı olarak, elde edilen modifiye bağlayıcıların sıcaklık etkisi incelendiğinde önemli ölçüde düştüğü ve bağlayıcıların daha sert bir kıvama geldiği tespit edilmiştir. Katkı kullanımı ile bağlayıcının performansı artmasına rağmen agregayla karıştırılması ve BSK'nın sıkıştırılması esnasında daha yüksek sıcaklık gerekeceğini, dolayısıyla plentte hazırlama esnasında daha çok enerji gerekeceğini göstermektedir.

4.5. Marshall Karışım Dizayn Yöntemi

Marshall dizayn yöntemi, maksimum boyutu 25 mm. (yaklaşık 1 inç) veya daha küçük agrega içeren ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış bitüm kullanılan BSK kaplamalara uygulanmaktadır [67,68]. Bu yöntem BSK kaplamaların laboratuvar ortamında optimum bitüm yüzdesinin bulunmasında kullanılmaktadır. Genel olarak Marshall dizayn yöntemi ile karışımda kullanılacak optimum bitüm içeriği aşağıda sıralanan yol izlenerek belirlenmektedir [67,68]:

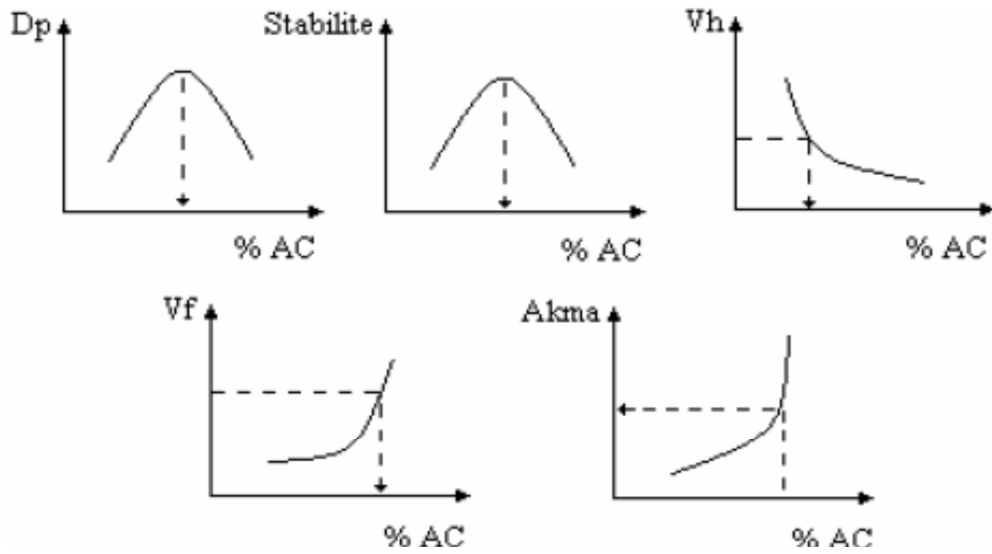
1. Şartnamelerde verilmiş uygun gradasyonlu agrega malzemesi ve uygun penetrasyonlu bitüm sınıfı seçilir.

2. Deney sonuç eğrilerinin optimum değeri gösterebileceği değişik bitüm yüzdellerinde bir seri deney numunesi hazırlanır. 101,6 mm (4 inç) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç) yüksekliğinde standart deney numuneleri kullanılır. Bu deney numuneleri bitüm-agrega karışımının ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması için belirlenmiş bir yöntem uygulanarak hazırlanır. Deney numuneleri, optimum değer in altında ve üstünde olmak üzere en az iki değişik bitüm yüzdesinde hazırlanır. Deney sonuçlarının sağlıklı olması için kullanılan her bitüm yüzdesinde en az üç deney numunesi hazırlanır.

3. Hazırlanan numuneler, standarda uygun şartlar altında, Marshall test cihazında denenerek stabilite ve akma değerleri bulunur. Akma değeri, test cihazından doğrudan alınırken, stabilite değeri, düzeltme faktörü ile düzeltilerek alınır. Akma değeri; stabilite ölçümü sırasında yüksüz ve maksimum yük arasında meydana gelen 0.25 mm (1/100 inç) cinsinden deformasyondur. Karışım

tasarımında, Marshall dizayn yönteminin iki temel niteliği; sıkıştırılmış deney numunelerinin stabilite-akma testi ve yoğunluk-boşluk analizleridir.

4. Analiz ve deney sonuçlarına bağlı olarak; Bitüm Yüzdesi-Pratik Özgül Ağırlık, Bitüm Yüzdesi-Stabilite, Bitüm Yüzdesi-Akma, Bitüm Yüzdesi-Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (V_f), Bitüm Yüzdesi-Hava Boşluğu Yüzdesi (V_h), Bitüm Yüzdesi-Agregalar Arası Boşluk (VMA) yüzdesi ilişkilerini veren grafikler çizilir. Temsili örnek grafikler Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Marshall metoduna ait temsili örnek grafikler

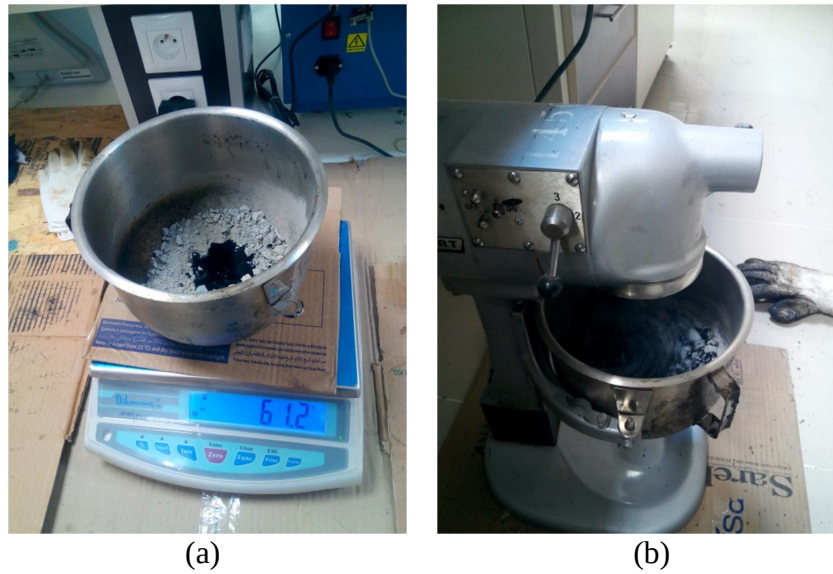
Bu grafiklerden, yoğunluk ve stabilite eğrilerinin maksimum değerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri, şartnamede belirtilen hava boşluğu yüzdesine (%4) ve bitümle dolu boşluk yüzdesine (%70) karşılık gelen bitüm yüzdeleri toplanarak bunların aritmetik ortalamalarından optimum bitüm muhtevası bulunmaktadır. Bulunan bu değer akma eğrisi üzerinde kontrol edilerek, buna karşılık gelen akma değerinin şartnameye uygun olup olmadığı kontrol edilmektedir [67,68,69].

4.5.1. Marshall Karışım Dizayn Yöntemi ile Deney Numunelerin Hazırlanması

Marshall metodu kullanılarak herhangi bir karışımın veya agrega gradasyonunun optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde, deney verilerine ilişkin eğrilerin net şekilde optimum değeri göstermeleri amacıyla farklı bitüm içerikleri aralığı için bir dizi deney numuneleri hazırlanmaktadır. Marshall deneylerinde, deney briketleri hazırlanmasında TS 3270’in öngördüğü hususlardan hareket edilmektedir. Her bitüm yüzdesi için üç adet briket numunesi hazırlanmakta ve bu briketlerde

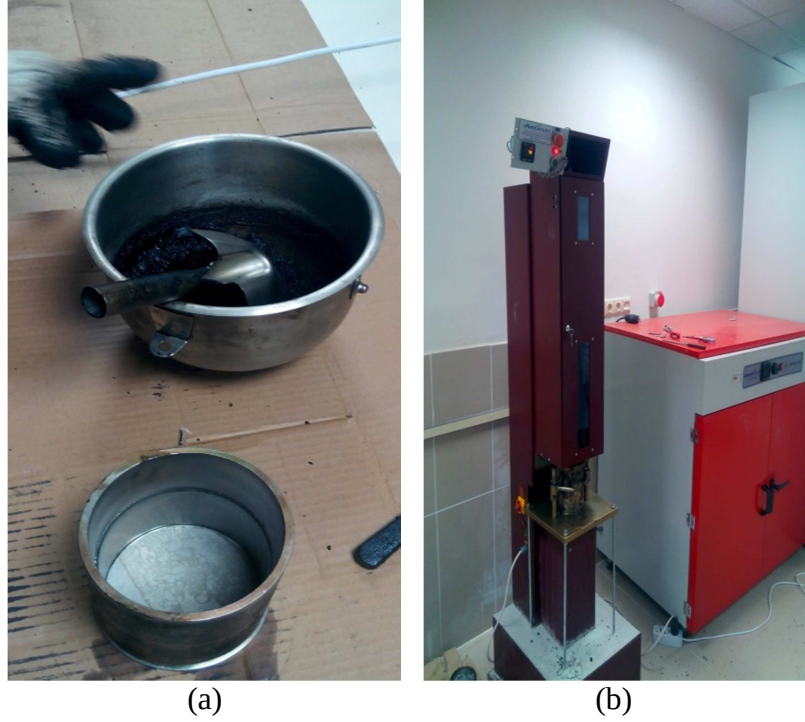
bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, kuru agreganın yüzdesi olarak karışımda kullanılmaktadır [68].

TS 3270'e uygun olarak hazırlanan agrega numuneleri 165 °C, bağlayıcı 152 °C karışım sıcaklığına kadar ısıtılır. Isıtılmış agrega, karıştırıcının kovalasına alınarak kuru şekilde karıştırılıp, karışımın orta kısmına bir çukur açılarak bağlayıcıdan belirli bir miktar dökülür. Şekil 4.20.a'da agregaya karıştırılan bağlayıcı bitüme ait deneysel çalışmadan bir görüntü verilmiştir. Agregaya, bitümlü malzeme ile iyice kaplanıncaya kadar karıştırıcı ile iyice karıştırılır. Karıştırma işlemi 1-2 dakika içerisinde yapılmalıdır. Şekil 4.20.b'de malzeme karıştırıcı gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Agregaya eklenen bitüm (a), Marshall karıştırıcısı (b)

Numune kalıpları her seferinde iyice temizlenmeli ve tokmağın sıkıştırma kafasında artık malzemenin kalmamasına özen gösterilmelidir. Daha önce etüvde 165 °C ısıtılmış kalıpların çapına göre daire şeklinde kesilmiş pelür kâğıt, malzeme kalıba konulmadan kalıbın tabanına yerleştirilir. Karışım, ayrışma olmamasına özen gösterilerek daha önceden ısıtılmış olan sıcak bir kürek ile kalıba aktararak, 15 defa kenarları ve 10 defa ortası spatula ile şişlenir. Numune üzerine tekrar pelür kâğıt konarak sıkıştırma aletine yerleştirilip 457 mm. yükseklikten serbest olarak düşen sıkıştırma tokmağı ile numuneye 75 darbe uygulanarak sıkıştırma yapılır. Aynı işlem numunenin diğer yüzeyine de uygulanır. Her numuneye toplamda 150 darbe uygulanarak sıkıştırma yapılır. Kalıba yerleştirilmeye hazır olan karışım, kalıba yerleştirilen kâğıt ve kalıp Şekil 4.21.a'da, sıkıştırmada kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.21.b'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Karışım ve hazır olan Marshall kalıbı (a), Marshall tokmağı (b)

Bu şekilde hazırlanan briketler, 24 saat kalıpta bekler. 24 saat sonra kriko ile kalıptan çıkarılarak spatula yardımıyla yüzeyi düzeltilir, tartılır ve havadaki kuru ağırlıkları alınır. Numunelerin en az üç yerinden yükseklikleri kumpas yardımıyla ölçülerek kayıt edilir. Daha sonra Arşimet terazisinde numunelerin sudaki ağırlıkları alınır. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra 3-5 dk. tüm yüzeyi suda kalacak şekilde bekletilir (numune boşlukları su ile doymun hale gelir) ve yüzeyinde parlaklık kalmayacak duruma gelene kadar hızlı bir şekilde yüzeyi havlu ile kurutularak tartılıp, doymun kuru yüzey ağırlığı alınır. Bu ağırlıklar, numunelerin özgül ağırlığının, boşluk oranının ve bitümle dolu boşluk oranının tespitinde kullanılmaktadır. Ayrıca bulunan değerler diğer deneylerde de kullanılmaktadır. Şekil 4.22.a’da numuneyi kalıptan çıkartırken kullanılan kriko ve Şekil 4.22.b’de numunenin yükseklik ölçümü yapılan kumpas gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.22 Numunenin krikoyla çıkarılması (a), kumpasla yüksekliğinin ölçülmesi (b)

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune $60\pm 1^\circ\text{C}$ suda 30-40 dakika bekletilir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilir, akma çubuğu sabitlenir ve yükleme yapılır (Şekil 4.23). Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir.



Şekil 4.23 Marshall stabilite-akma deney cihazı

Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63.5 mm. dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir.

4.5.2. Marshall Karışım Dizayn Yöntemi ile Optimum Bitüm Yüzdesi Bulunması

Optimum bitüm yüzdesinin (oranının) tespit edilmesi için agrega gradasyonu sabit tutularak %3.5-%4.0-%4.5-%5.0-%5.5-%6.0 oranlarında, her bir bitüm %'sinden üçer adet numune olmak üzere toplam 18 adet numune hazırlanmıştır. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin havadaki, sudaki ve doymun yüzey kuru haldeki ağırlıkları tespit edilerek hacimleri, birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

Bu şekilde deneye tabi tutulan her bitüm %'sinden üçer adet olmak üzere toplam 18 adet Marshall numunelerine ait deney sonuçları Tablo 4.14'te verilmiştir. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymun yüzey kuru haldeki ağırlıkları alınarak Formül 4.3-4.15'in yardımıyla hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde denenerek stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler kullanılarak stabilite, D_p , V_h , V_f ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

Maksimum birim ağırlığında ve stabilitede, %4 boşluk oranında ve %70 asfaltla dolu boşluk oranında bitüm yüzdesinin ortalaması alınarak optimum bitüm oranı tespit edilmiştir.

Şekil 4.24-4.29'da aynı bağlayıcı bitüm kullanılarak elde edilen numunelerin, optimum bitüm içeriklerinin tayininde kullanılan grafiklerini göstermektedir. Tablo 4.14'te ve hesaplamalarda kullanılan formül ve bağıntılar (Formül 4.3-4.15) ise aşağıda gösterilmiştir.

$$V = B - C \quad (4.3)$$

$$D_p = A/V \quad (4.4)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (4.5)$$

$$W_a = (WB/WA) \times 100 \quad (4.6)$$

$$W_b = (WB/WA+WB) \times 100 \quad (4.7)$$

$$G_{sb} = \frac{100}{\left(\frac{\%K}{G_k - h}\right) + \left(\frac{\%I}{G_i - h}\right) + \left(\frac{\%F}{G_f - z}\right)} \quad (4.8)$$

$$D_t = \frac{100}{\left[\frac{100 - W_b}{G_{se}}\right] + \left[\frac{W_b}{G_b}\right]} \quad (4.9)$$

$$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa})/2 \quad (4.10)$$

$$V_h = \frac{Dt - D_{port}}{Dt} \times 100 \quad (4.11)$$

$$V_b = (P_{be} \times D_{port})/G_b \quad (4.12)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (4.13)$$

$$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (4.14)$$

$$V_f = (V_b/V_{ma}) \times 100 \quad (4.15)$$

Wa: Agregaya göre seçilen bitüm %'si

Wb: Karışıma göre seçilen bitüm %'si

WA: Toplam agregaya ağırlığı (1200gr)

WB: Bitüm ağırlığı (agregaya göre)

A: Havadaki kuru ağırlık

B: Doygun-yüzey kuru ağırlık

C: Sudaki ağırlık

V: Numunenin hacmi

Dp: Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı

Dp_{ort}: Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı

Dt: Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı

Vh: Numunedeki boşluk yüzdesi

Vb: Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si

Va: Numunedeki agregaya hacmi %'si

Vma: Agregalar arasındaki boşluk %'si

Vf: Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si

P_{be}: Agreg ağırlığına göre efektif bitüm %'si

G_{se}: Agreg efektif özgül ağırlığı

G_{sa}: Agreg zahiri özgül ağırlığı

G_{sb}: Agreg hacim özgül ağırlığı

%K: Karışımdaki kaba agreg %'si

%İ: Karışımdaki ince agreg %'si

%F: Karışımdaki filler %'si

Hazırlanan deney numunelerine ait gerekli ölçüm ve hesaplamalardan %4 bitüm içeren 1. deney numunesine ait yapılan hesaplar detaylı olarak aşağıda gösterilmiştir.

Kaba agreg=% 42, G_{k-h} =2,648 gr/cm³

İnce agreg=% 53, G_{i-h} =2,664 gr/cm³

Filler=% 5, G_{f-z} =2,751 gr/cm³

Bitüm oranı=%4, G_b=1,032 gr/cm³

W_a = (48/1200)×100 =4,0

W_b= (48/48+1200)×100 =3,85

V = 1242,95-713,6=529,35 cm³

D_p =1234,5/529,35=2,332 gr/cm³

D_{port}= (2,332+ 2,328+ 2,330)/3=2,330 gr/cm³

$$G_{sb} = \frac{100}{\left(\frac{42}{2,648}\right) + \left(\frac{53}{2,664}\right) + \left(\frac{5}{2,751}\right)} = 2,661 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_t = \frac{100}{\left[\frac{100 - 3,85}{2,697}\right] + \left[\frac{3,85}{1,032}\right]} = 2,540 \text{ gr/cm}^3$$

G_{se} = (2,661+2,733)/2= 2,697 gr/cm³

$$V_h = \frac{2,540 - 2,330}{2,540} \times 100 = 8,26$$

$$V_b = (3,35 \times 2,330) / 1,032 = 7,56$$

$$V_a = 100 - (8,26 + 7,56) = 84,18$$

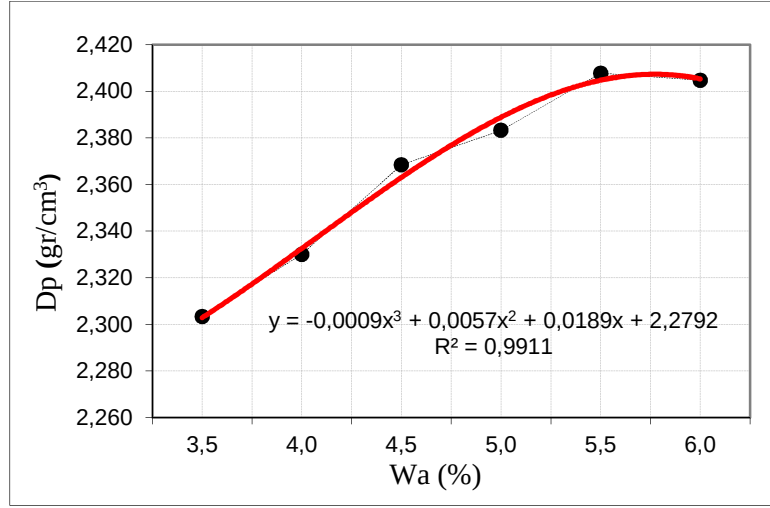
$$V_{ma} = 100 - 84,18 = 15,82$$

$$V_f = (7,56 / 15,82) \times 100 = 47,80$$

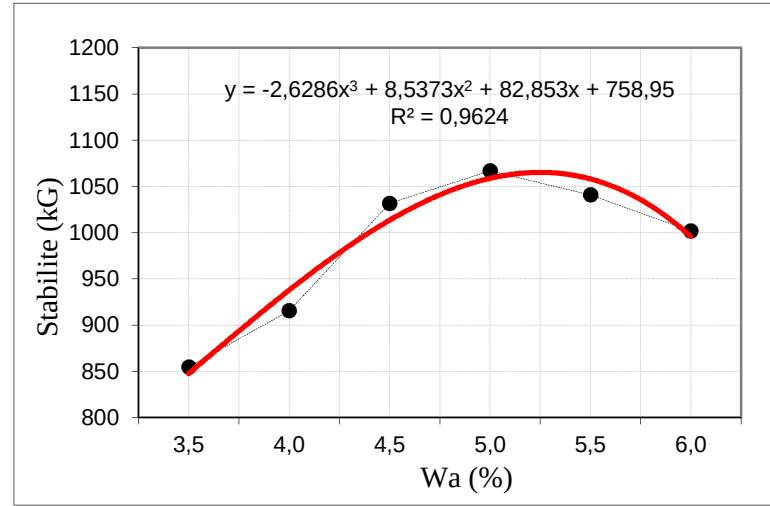
Aynı biçimde her bitüm yüzdesi ve her bir numune için de değerler hesaplanmıştır ve tabloya işlenmiştir. Bu değerler Tablo 4.14'te gösterilmiştir.

Tablo 4.14 Marshall dizayn yöntemiyle B 100/150 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları

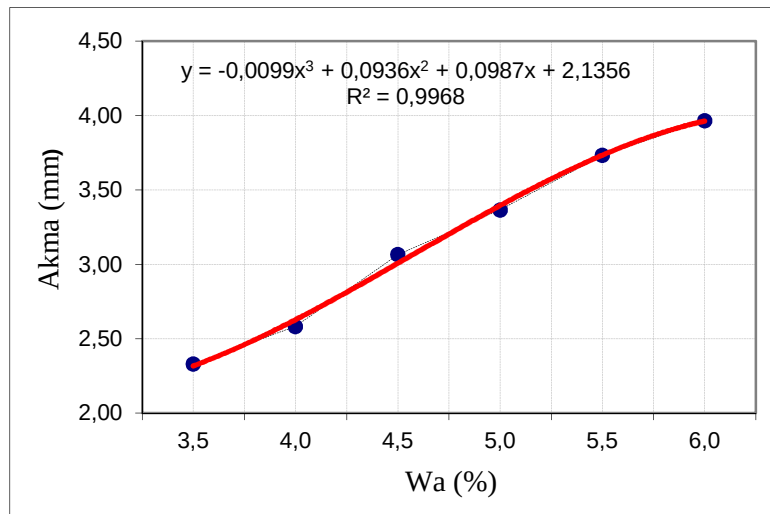
No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği (mm)			A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy.) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Sib. (kN)	Dz.Fak.	Dz.Sib (kG)
				1	2	3	Ort														
1	3,5	3,38	42,00	67,4	67,3	66,8	67,14	706	1237,1	531,1	2,311							2,34	9,8	0,897	879
2				66,8	66,4	67,5	66,9	702,1	1236,1	534	2,294							2,13	9,8	0,888	870
3				67	66,6	67,5	67,02	701,6	1232,36	530,8	2,305							2,52	9,2	0,886	815
ORTALAMALAR																					
4	4,0	3,85	48,00	67,0	66,7	65,9	66,52	713,6	1242,95	529,4	2,332							2,8	10	0,894	894
5				66,3	67,2	66,3	66,6	708,8	1237,63	528,8	2,328							2,54	10	0,906	906
6				66,5	66,5	66,0	66,34	711,9	1241,32	529,4	2,330							2,41	10,31	0,918	946
ORTALAMALAR																					
7	4,5	4,31	54,00	64,9	65,2	65,1	65,05	724,9	1249,5	524,6	2,372							3	11,5	0,930	1070
8				66,6	66,1	66,2	66,3	717,5	1242,42	524,9	2,362							3,10	10,5	0,930	977
9				64,8	65,2	65,8	65,27	721,4	1243,1	521,7	2,372							3,10	11,4	0,920	1049
ORTALAMALAR																					
10	5,0	4,76	60,00	65,6	66,4	65,5	65,83	726,5	1249,2	522,7	2,384							3,5	11,5	0,949	1091
11				65,4	66,2	65,5	65,7	725,8	1248,1	522,3	2,385							3,30	10,8	0,938	1013
12				66,4	66,3	66,9	66,53	725,1	1248,2	523,1	2,380							3,30	11,6	0,945	1096
ORTALAMALAR																					
13	5,5	5,21	66,00	65,2	65,5	64,6	65,1	733,8	1252,1	518,3	2,413							4	11,3	0,951	1075
14				64,7	65,4	65,7	65,3	730,4	1250	519,6	2,403							3,50	10,7	0,953	1020
15				64,5	65,4	65,1	65	734	1255	521	2,407							3,70	10,8	0,952	1028
ORTALAMALAR																					
16	6,0	5,66	72,00	65,5	65,1	65,6	65,4	736,6	1261,35	524,8	2,402							3,8	10,1	0,955	965
17				64,7	64,5	65,9	65,0	736,8	1261,31	524,5	2,402							3,80	10,7	0,967	1035
18				65,8	65,8	65,1	65,57	739,3	1263,3	524	2,410							4,30	10,6	0,949	1006
ORTALAMALAR																					
											2,405	2,472	2,70	12,05	85,25	14,75	81,69	3,967			1002



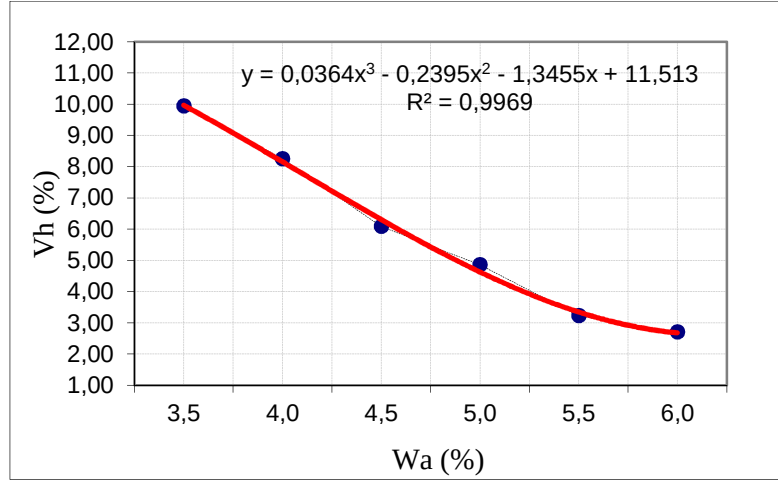
Şekil 4.24 Dp- Bitüm %'si



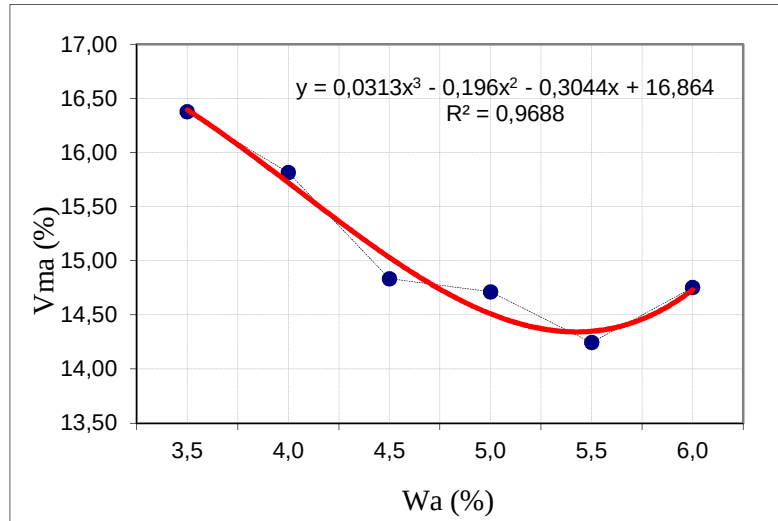
Şekil 4.25 Stabilite- Bitüm %'si



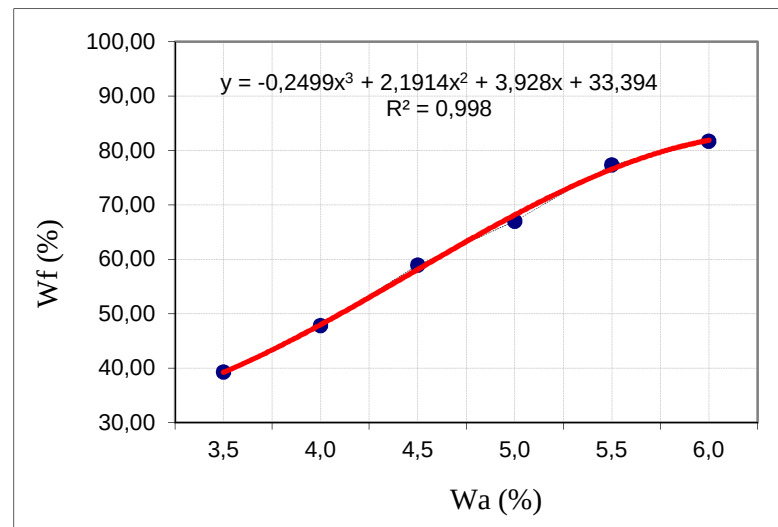
Şekil 4.26 Akma- Bitüm %'si



Şekil 4.27 Vh- Bitüm %'si



Şekil 4.28 VMA- Bitüm %'si



Şekil 4.29 Vf- Bitüm %'si

Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdelere, boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e tekabül ettiği yüzdelere alınmıştır. Bu alınan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm oranı %5,2 olarak belirlenmiştir. Tablo 4.15, optimum bitüm içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir. Her bir bağlayıcı türü için optimum bitüm oranında üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen sonuçlara ait değerler ve şartname limitleri Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.15. Optimum bitüm içeriği tespitinde kullanılan değerler

Kriterler	Elde Edilen Değerler
Maksimum Stabilité	5,0
Maksimum D _p	5,5
%4 V _h	5,2
%70 V _f	5,1
Optimum Bitüm Oranı	% 5,2

Tablo 4.16. Optimum bitüm oranı deney sonuçları

No	Wa	Wb	WB	hort	A (hava)	C (su)	B (doy.)	V	Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vf	Akma	Stb.	Dz.Fak	Dz.Stb
	(%)	(%)	(gr)		(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	gr/cm ³	gr/cm ³	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)
1	5,2	4,94	62,40	66,23	1245	722,8	1246	522,7	2,382							3,55	11,2	0,936	1048
2				65,9	1248	726,3	1248	522	2,391							3,10	11,3	0,943	1066
3				65,4	1246	724,2	1247	522,3	2,386							3,30	11,1	0,951	1056
OPTİMUM BİTÜM ORANI SONUÇLARI									2,386	2,498	4,48	10,29	85,23	14,77	69,65	3,32			1057

Optimum bitüm içeriklerinde Marshall dizayn yöntemine göre hazırlanan saf ve modifiye bitümlü karışım numunelerinden elde edilen değerler ve şartname kriterleri Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Optimum bitümde hazırlanan karışım numunelerinin değerleri

Kriterler	B 100/150	B 100/150+ 0.5 ELV	B 100/150+ 0.75 ELV	B 100/150+ 1.0 ELV	Şartname Kriteri
Optimum bitüm (%)	5,2				%4-7
Dp (gr/cm ³)	2,386	2,372	2,369	2,364	–
Boşluk (Vh, %)	4,48	4,28	4,17	4,02	(3-5)
Asfaltla dolu boşluk (Vf, %)	69,65	71,21	72,08	72,74	65-75
Agregalar arası boşluk miktarı (VMA, %)	14,77	14,57	14,45	14,32	min. 14
Stabilite (kgf)	1057	1114	1126	1093	min. 900
Akma (mm)	3,32	3,02	2,78	2,79	(2-4)
Filler/bitüm oranı	0,96	0,96	0,96	0,96	maks. 1,5
Marshall oranı (kgf/mm)	318,37	368,87	405,04	391,76	–

Bulunan bu %5,2 optimum bitüm oranında, Marshall karışım dizayn yöntemine göre hazırlanan saf ve modifiye bitümlü karışımlar üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için karışım performans deneyleri uygulanmıştır.

4.6. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Çalışmada; Marshall karışım dizayn yöntemiyle bulunan optimum bitüm içeriğinde saf ve modifiye bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü deneyi, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri yapılmıştır. Performans deneylerinde kullanılmak üzere Marshall dizayn yöntemine göre hazırlanan ve her bir deney için kullanılan numune sayıları Tablo 4.18’de gösterilmiştir.

Tablo 4.18. Karışım performans deneylerinde kullanılan numune sayıları

Karışım Performans Deneyi	Karışım Türü			
	B 100/150	B 100/150 + %0.5 ELV	B 100/150 + %0.75 ELV	B 100/150 + %1.0 ELV
Mashall Stabilite ve Akma Deneyi	6	6	6	6
ITS ve AASHTO T-283 Deneyi	6	6	6	6
ITSM ve Yorulma Deneyi	3	3	3	3
Dinamik Sünme Deneyi	3	3	3	3
Toplam	18	18	18	18
Toplam Numune Sayısı	72			

4.6.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

B 100/150 saf bitümü ve %0.5, %0.75 ve %1.0 Elvaloy Ret polimer modifiye bitümleri kullanılarak optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall Stabilesi (RMS) deneyleri uygulanmıştır. Normal Marshall stabilite ve akma deneyinde numuneler TS EN 12697-34 standardına göre 60 °C suda 40 dakika bekletilerek deneye tabi tutulmuştur. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan RMS değerini belirlemek amacıyla numuneler 60 °C suda 24 saat bekletildikten sonra Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada 60 °C suda 24 saat bekletilen numuneler “koşullandırılmış” olarak adlandırılmıştır. Tablo 4.19-4.20’de koşullandırılmış ve koşullandırılmamış (normal) Marshall numunelerine ait stabilite ve akma değerleri ile stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle bulunan Marshall oranı (MQ) değerleri verilmiştir. Tablo 4.19-4.20’de ortalama yükseklik h, yoğunluk D_p ve havadaki, sudaki, doymuş ağırlıklar sırasıyla A, B, C ile belirtilmiştir.

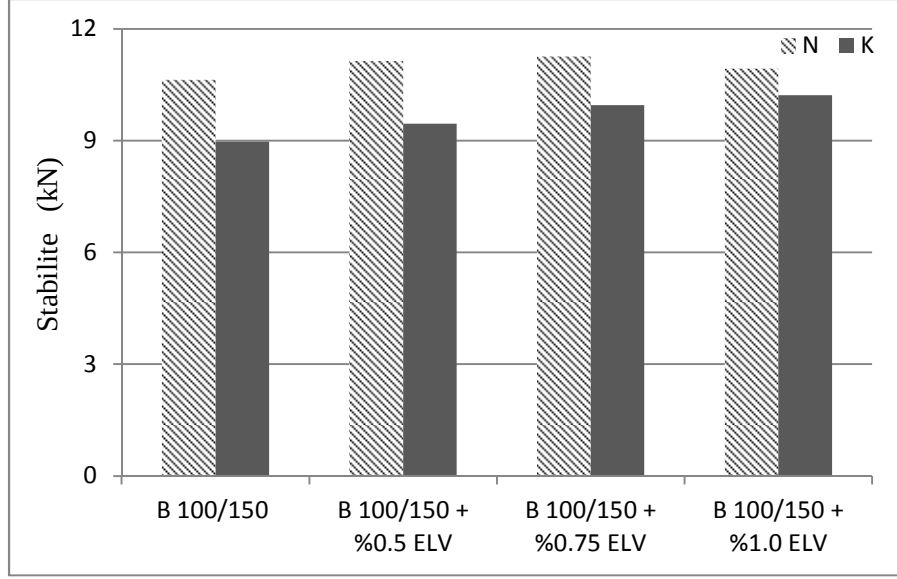
Tablo 4.19. Koşullandırılmamış (Normal) Marshall stabilite-akma deney sonuçları

Karışım Türü	h (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	D_p (gr/cm ³)	Stabilite (kN)	Akma (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilen Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
B 100/150	66,13	1244	722,3	1245	2,377	11,56	3,74	0,938	10,84	3,26
	66,7	1246	722,9	1247	2,376	11,84	2,63	0,925	10,95	
	65,9	1245	722,7	1246	2,378	11,12	3,4	0,943	10,49	
	Ortalama						3,26		10,63	
B 100/150 + %0.5 ELV	66,08	1251	726,1	1253	2,376	11,77	2,63	0,938	11,04	3,69
	66,09	1247	722,4	1249	2,37	12,37	3,74	0,938	11,6	
	66,29	1251	726	1252	2,378	11,54	2,69	0,934	10,78	
	Ortalama						3,02		11,14	
B 100/150 + %0.75 ELV	66,51	1248	723,6	1249	2,373	12,35	3,82	0,93	11,49	4,05
	65,9	1246	721,7	1247	2,37	11,79	2,47	0,943	11,12	
	66,34	1250	725	1251	2,375	11,98	3,05	0,933	11,18	
	Ortalama						2,78		11,26	
B 100/150 + %1.0 ELV	67,24	1252	720,4	1255	2,342	11,63	2,84	0,912	10,61	3,91
	67,26	1250	718	1252	2,34	11,76	2,31	0,912	10,73	
	67,11	1250	719,3	1253	2,341	12,5	3,23	0,915	11,44	
	Ortalama						2,79		10,93	

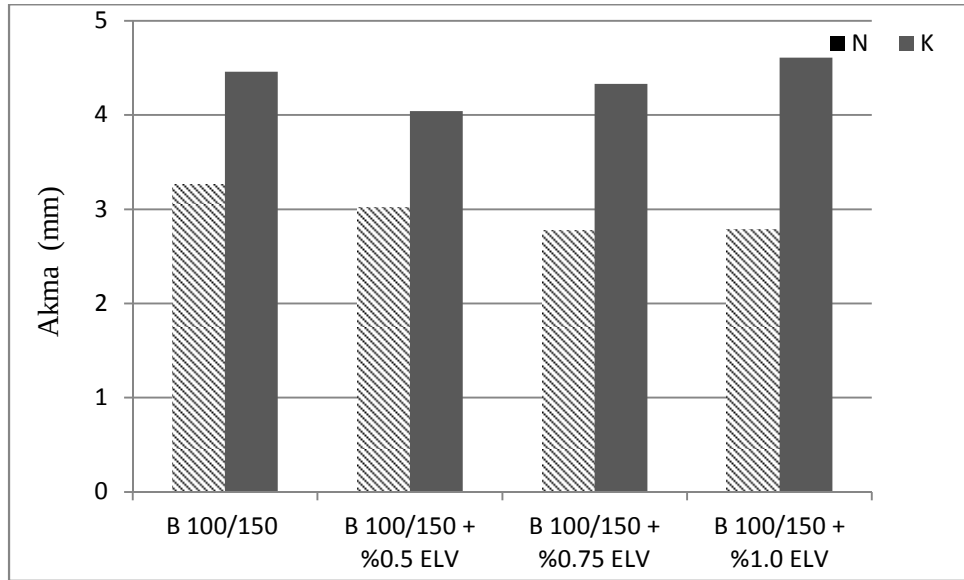
Tablo 4.20. Koşullandırılmış Marshall stabilite-akma deney sonuçları

Karışım Türü	h (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Dp (gr/cm ³)	Stabilite (kN)	Akma (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilen Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
B 100/150	65,89	1245	724,2	1246	2,383	8,93	4,3	0,943	8,42	2,01
	65,82	1244	723,2	1245	2,384	10,17	4,98	0,945	9,61	
	65,92	1247	724,4	1248	2,383	9,42	4,1	0,943	8,88	
	Ortalama						4,46		8,97	
B 100/150 + %0.5 ELV	66,64	1250	722,5	1251	2,363	10,81	3,38	0,926	10,01	2,34
	66,47	1248	721,6	1249	2,364	9,81	4,68	0,93	9,12	
	66,19	1248	722,2	1250	2,364	9,85	4,05	0,936	9,22	
	Ortalama						4,04		9,45	
B 100/150 + %0.75 ELV	66,34	1249	723,5	1250	2,371	10,36	4,39	0,933	9,67	2,3
	66,34	1248	723,1	1249	2,372	10,62	4,55	0,933	9,91	
	66,35	1249	724,3	1251	2,372	11,01	4,05	0,933	10,27	
	Ortalama						4,33		9,95	
B 100/150 + %1.0 ELV	67,22	1249	718,9	1253	2,337	10,87	4,09	0,913	9,92	2,21
	66,92	1248	718,7	1252	2,338	11,08	4,85	0,92	10,19	
	67,25	1248	719,2	1252	2,34	11,57	4,9	0,912	10,55	
	Ortalama						4,61		10,22	

Koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.30’da, akma değerlerinin saf ve modifiye bitümlü karışımlar için değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir. Karışımların Marshall stabilite değerlerinin akma değerlerine bölümünden elde edilen, servis esnasında kalıcı deformasyona karşı malzeme direncinin bir ölçüsü olarak ifade edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin değişimi ise Şekil 4.32’de verilmiştir. Tablolarda koşullandırılmayan (normal) karışım numuneleri ‘‘N’’ ve koşullandırılmış karışım numuneleri ‘‘K’’ olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.30 Karışımların stabilite değerlerinin katkı miktarıyla değişimi

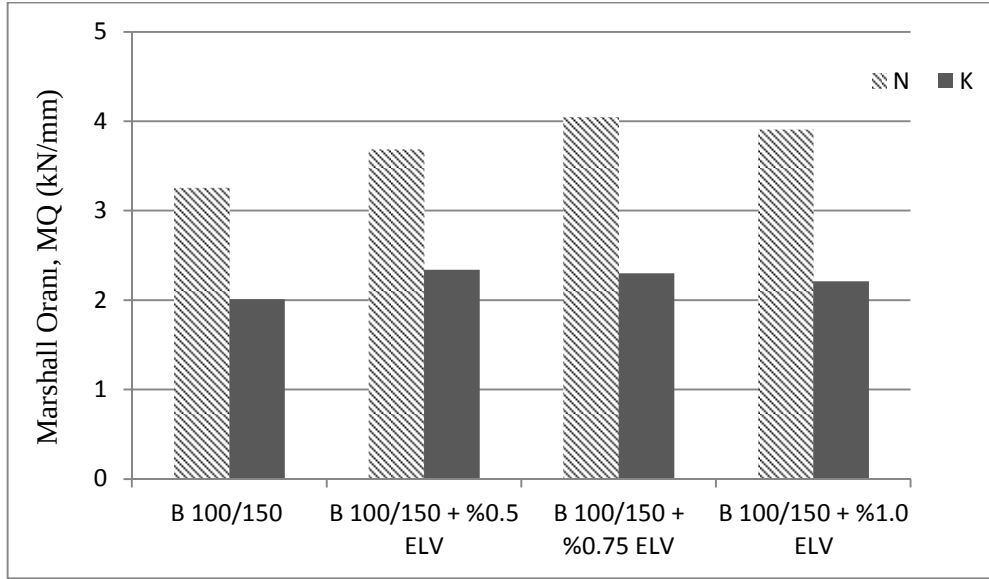


Şekil 4.31 Karışımların akma değerlerinin katkı miktarıyla değişimi

Koşullandırılmamış ‘‘N’’ modifiye karışımlarında en yüksek stabilite değerine %0.75 oranında Elvaloy Ret içeren karışımın, koşullandırılmış ‘‘K’’ modifiye numunelerinde ise %1.0 oranında Elvaloy Ret içeren modifiye karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük stabilite değerlerine ise her iki durumda da %1.0 oranında Elvaloy Ret içeren karışımlar sahip olmuştur.

N ve K karışımlarında akma değerleri, saf karışıma göre modifiye karışımlarda genel olarak azalma göstermiştir. Ancak K karışımlarında %1.0

oranında Elvaloy Ret içeren modifiye karışımların akma değeri saf karışıma göre artış göstermiştir.



Şekil 4.32 Karışımların Marshall oranı değerlerinin katkı miktarıyla değişimi

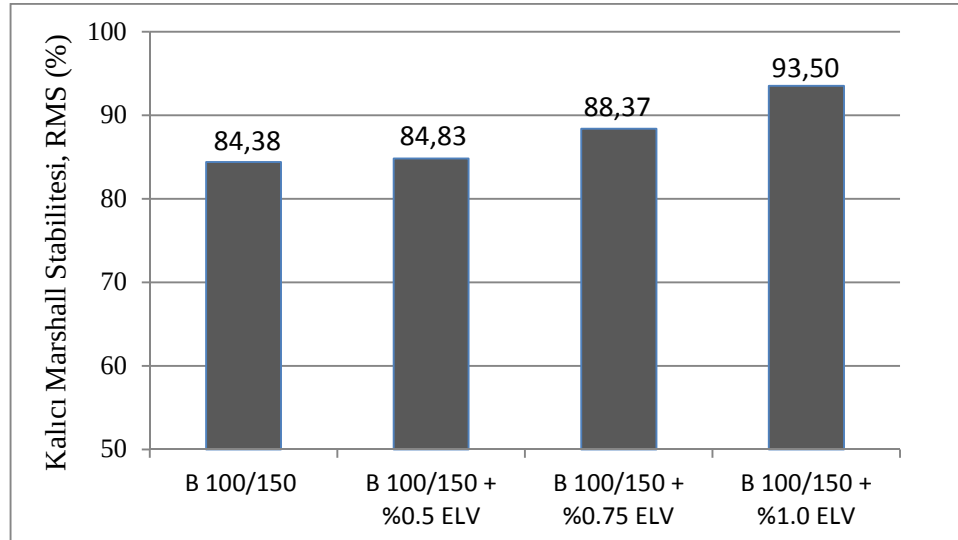
En yüksek Marshall oranı değerini; N karışımlarında %0.75 oranında Elvaloy Ret içeren modifiye karışımlar, K karışımlarında ise %0.5 oranında Elvaloy Ret içeren modifiye karışımlar göstermiştir.

Son olarak koşullandırılmış karışım numunelerinin stabilite değerlerinin, koşullandırılmamış karışım numunelerinin stabilite değerlerine bölünmesiyle nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan karışım numunelerinin kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerleri bulunarak Tablo 4.21’de gösterilmiştir. Ayrıca saf ve modifiye karışımların RMS değerlerinin katkı oranı ile değişimi de Şekil 4.33’te verilmiştir.

Tablo 4.21. Karışımların kalıcı Marshall stabilite (RMS) değerleri

Karışım Türü	Koşullandırılmış Numunelerin Stabilite Değerleri (kN)	Normal Numunelerin Stabilite Değerleri (kN)	RMS (%)
B 100/150	8,42	10,84	84,38
	9,61	10,95	
	8,88	10,49	
	Ortalama: 8,97	10,63	
B 100/150 + %0.5 ELV	10,01	11,04	84,83
	9,12	11,6	
	9,22	10,78	
	Ortalama: 9,45	11,14	
B 100/150 + %0.75 ELV	9,67	11,49	88,37
	9,91	11,12	
	10,27	11,18	
	Ortalama: 9,95	11,26	
B 100/150 + %1.0 ELV	9,92	10,61	93,50
	10,19	10,73	
	10,55	11,44	
	Ortalama: 10,22	10,93	

Tablo 4.21 incelendiğinde; saf ve modifiye karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının %80'in üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.33 Karışımların RMS değerlerinin katkı miktarıyla değişimi

Şekil 4.33 incelendiğinde; karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) karışım numunelerinin RMS değerleri saf karışıma göre yaklaşık sırasıyla %1.01, %1.05 ve %1.11 artış göstermiştir.

4.6.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T-283 Deney Sonuçları

Saf ve Elvaloy Ret katkılı karışımlar üzerinde AASHTO T-283 standardına göre çekme dayanımı oranı belirlenerek karışımların nem hasarına karşı dayanımları tespit edilmiştir. B 100/150 saf bitümü ve %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında Elvaloy Ret içeren modifiye bitümleri ile hazırlanan her bir karışım türü için 7 ± 0.5 boşluk oranında altışar adet numune hazırlanmıştır. Bu altı numunenin üçü koşullandırılarak, diğer üçü de koşullandırılmadan deneylere tabi tutulmuştur. AASHTO T-283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken Marshall tokmağı ile 35 darbe uygulanarak numune sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler, -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C 'deki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Şekil 4.34.a'da vakumlama işleminde kullanılarak numuneyi %70-80 oranında doymun hale getiren manometre cihazı ve Şekil 4.34.b'de de dondurucuda -18°C sıcaklıkta 16 saat bekletilen deney numunelerine ait bir görüntü verilmiştir.



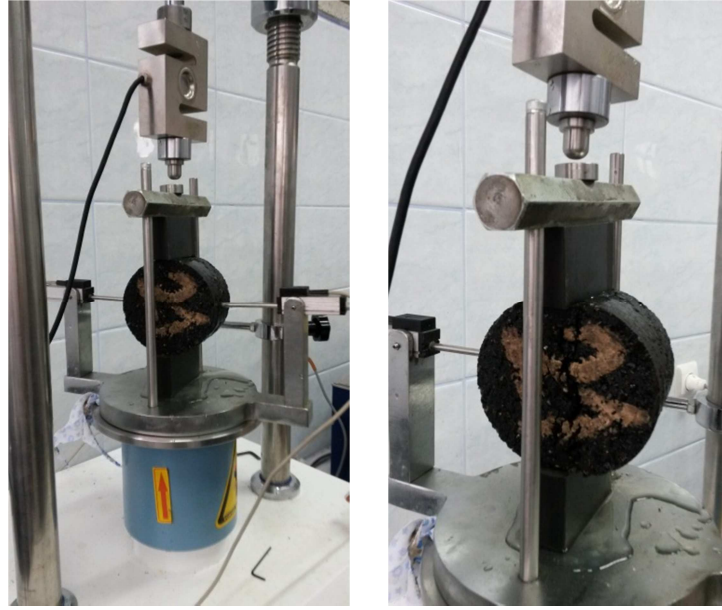
(a)



(b)

Şekil 4.34 Vakumlama cihazı (a), dondurucuda bekletilen deney numuneleri (b)

Daha sonra bu numuneler 25 °C sıcaklıktaki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır (Şekil 4.35). Bu işlemler uygulanan numuneler koşullandırılmış numuneler olarak adlandırılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler de 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50.8 mm/dk) sabit yükleme hızı uygulanmıştır.



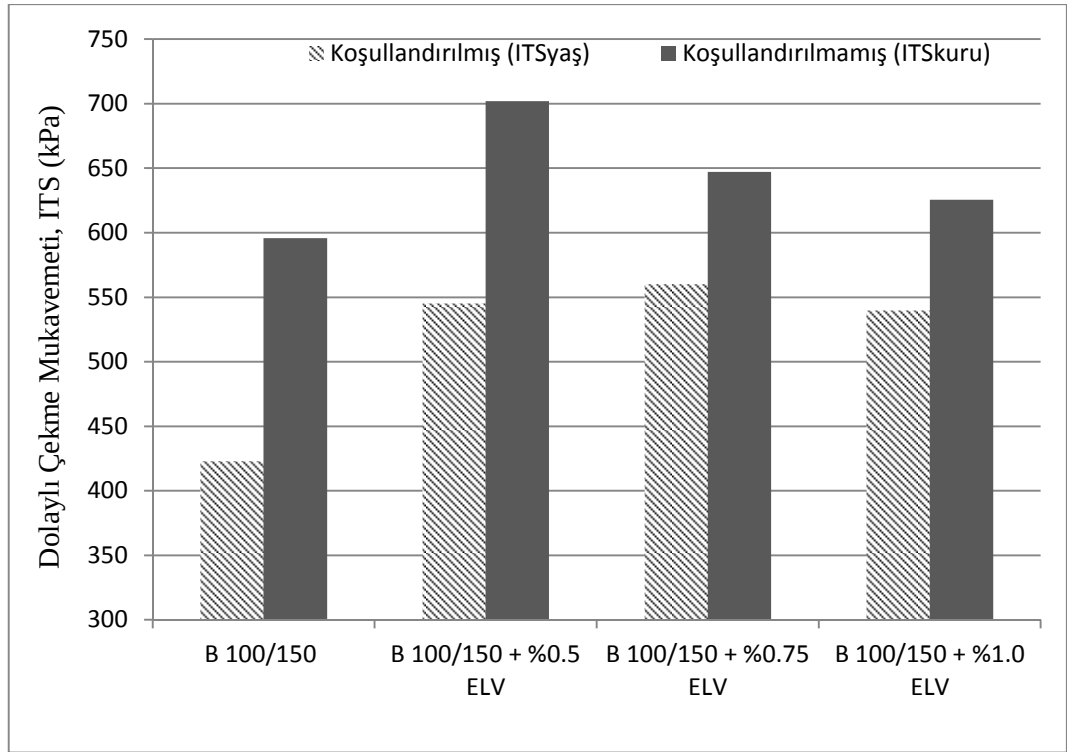
Şekil 4.35 ITS deneyi uygulanan numune (a) ve kırılmış hali (b)

Tablo 4.22'de ITS deneyine tabi tutulan saf ve modifiye bitümlü karışım numunelerinden koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri $ITS_{yaş}$, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ITS_{kuru} olarak verilmiştir. Bu koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ($ITS_{yaş}$), koşullandırılmamış numunelerin (ITS_{kuru}) dolaylı çekme mukavemeti değerine bölünmesiyle nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) tespit edilmiş ve tabloda verilmiştir.

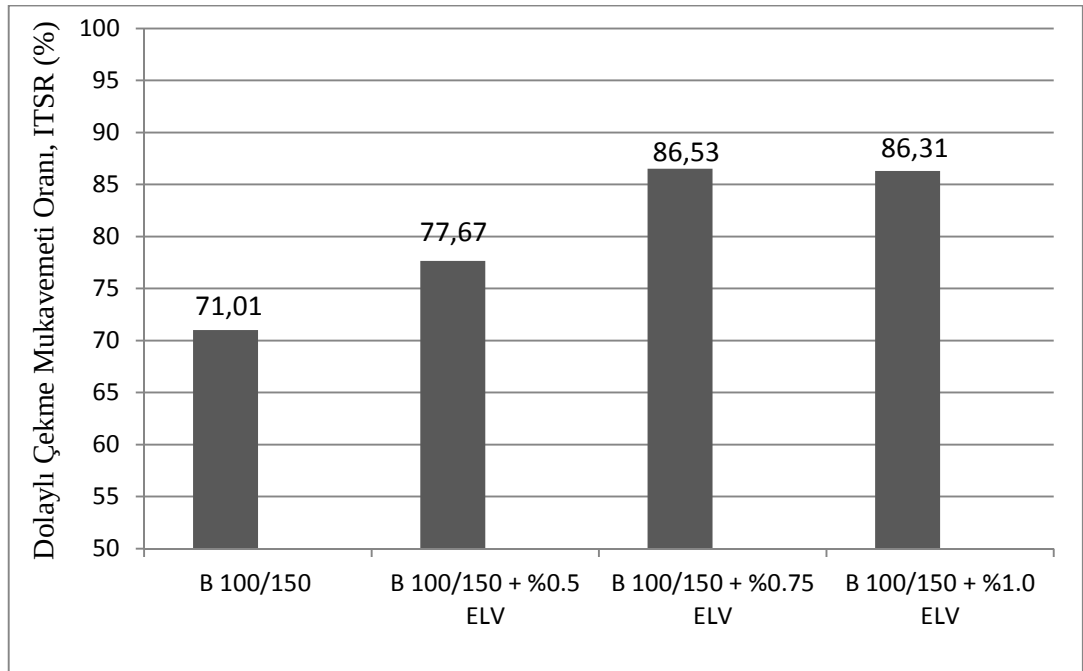
Tablo 4.22. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve oranları (ITSR)

Karışım Türü	Numune No	Koşullandırılmış Numuneler		Koşullandırılmamış Numuneler		ITSR (%)
		Ortalama Yükseklik (mm)	ITSyaş (kPa)	Ortalama Yükseklik (mm)	ITSkuru (kPa)	
B 100/150	1	65,63	427,2	65,67	592,28	71,01
	2	65,97	426,59	65,98	624,05	
	3	65,71	415,19	66,19	570,79	
	Ortalama		422,99		595,71	
B 100/150 + %0.5 ELV	1	67,34	569,66	66,57	697,48	77,67
	2	67,09	555,72	66,3	680,06	
	3	66,82	510,2	66,94	728,34	
	Ortalama		545,19		701,96	
B 100/150 + %0.75 ELV	1	65,9	545,03	67,25	577,72	86,53
	2	65,88	566,11	66,85	694,12	
	3	66,22	568,86	67,06	669,68	
	Ortalama		560		647,17	
B 100/150 + %1.0 ELV	1	66,98	547,78	66,57	598,8	86,31
	2	67,29	527	66,98	609,8	
	3	66,92	544,72	66,53	667,84	
	Ortalama		539,83		625,48	

Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış saf ve modifiye bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri, sırasıyla Şekil 4.36’da ve Şekil 4.37’de sütun grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.36 Karışımların ITS değerleri



Şekil 4.37 Karışımların ITSR değerleri

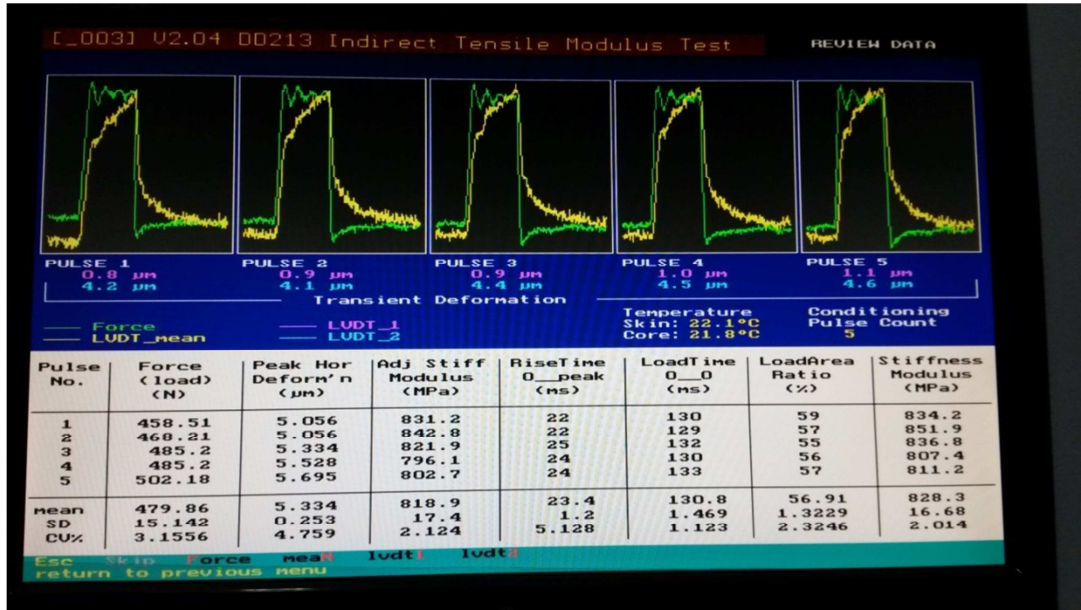
Şekil 4.36 incelendiğinde; karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) saf bitümlü karışım numunelerine göre koşullandırılmamış (ITS_{kuru}) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti değerleri sırasıyla %17.84, 8.64,

5.0 ve koşullandırılmış ($ITS_{yaş}$) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti değerleri ise sırasıyla %28.89, %32.39, %27.62 kadar artış göstermiştir. Koşullandırılmamış modifiye karışım numunelerinde en iyi sonuç %0.5 Elvaloy Ret içeren karışımlarda, koşullandırılmış numunelerde ise en iyi sonuç %0.75 Elvaloy Ret katkılı karışımlarda elde edilmiştir.

Şekil 4.37 incelendiğinde; karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri yaklaşık sırasıyla %9.4, %21.86 ve %21.55 artış göstermiştir. En yüksek ITSR değeri %0.75 Elvaloy Ret içeren modifiye karışımlarda görülmüştür. Saf ve modifiye karışımlarda ITSR değerlerinin %70'in üzerinde olmasından, nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Elvaloy Ret katkı kullanımı ile hazırlanan modifiye karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğu görülmektedir.

4.6.3. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları

Saf ve Elvaloy Ret katkılı karışımlar üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. Deneyde B 100/150 saf bitümünden ve %0.5, %0.75 ve %1.0 Elvaloy Ret içeren numunelerden üçer adet olmak üzere toplam on iki numune deneye tabi tutulmuştur. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. Yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi ise 124 ms olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 μ m olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 μ m deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Şekil 4.38'de ITSM deney sonundaki ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.38 ITSM deney sonu ekran görüntüsü

Deneyde poisson oranı 0.35 olarak alınmıştır. Ayrıca sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneyler 20 °C ve 30 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. Tablo 4.23'te 20 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçları ve Tablo 4.24'te 30 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçları verilmiştir.

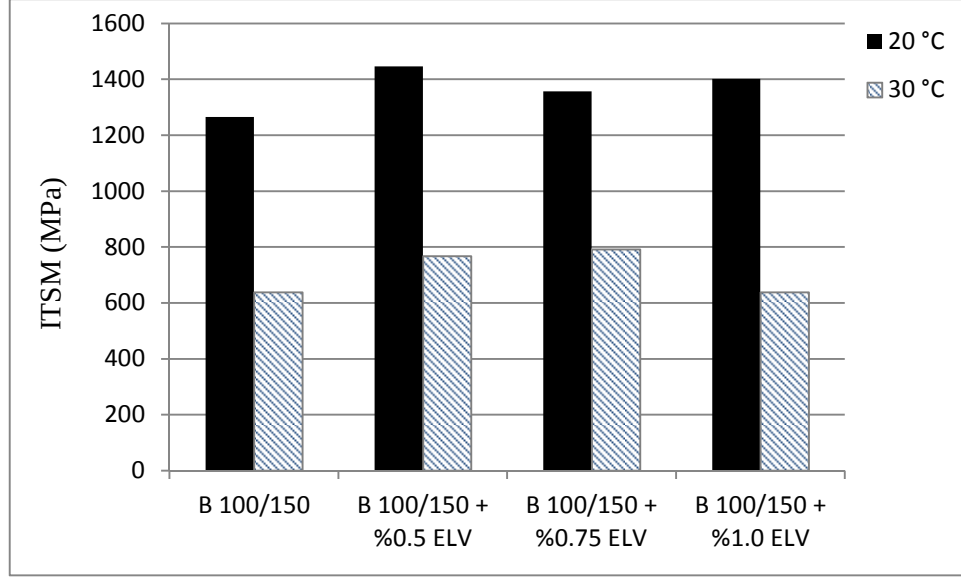
Tablo 4.23. ITSM deney sonuçları (20 °C)

Karışım Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Deneme No	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)
B 100/150	1	66,19	1	1470	1412,5
			2	1355	
	2	65,9	1	1041	1070
			2	1099	
	3	66,06	1	1235	1314,5
			2	1394	
	Ortalama				1265,7
B 100/150 + %0.5 ELV	1	66,74	1	1385	1435
			2	1485	
	2	66,47	1	1425	1431,5
			2	1438	
	3	66,52	1	1451	1471,5
			2	1492	
	Ortalama				1446,0
B 100/150 + % 0.75 ELV	1	66,47	1	1355	1401,5
			2	1448	
	2	66,81	1	1265	1286
			2	1307	
	3	66,47	1	1440	1384
			2	1328	
	Ortalama				1357,2
B 100/150 + % 1.0 ELV	1	67,39	1	1233	1220
			2	1207	
	2	67	1	1376	1321
			2	1266	
	3	67,28	1	1636	1663,5
			2	1691	
	Ortalama				1401,5

Tablo 4.24. ITSM deney sonuçları (30 °C)

Karışım Türü	Numune No	hort, (mm)	Deneme No	ITSM, (MPa)	ITSMort, (MPa)
B 100/150	1	66,19	1	711,6	728,8
			2	746	
	2	65,9	1	602,7	603,55
			2	604,4	
	3	66,06	1	616,5	579,85
			2	543,2	
	Ortalama				637,4
B 100/150 + %0.5 ELV	1	66,74	1	672,3	642,6
			2	612,9	
	2	66,47	1	848,6	794,55
			2	740,5	
	3	66,52	1	912,7	864,2
			2	815,7	
	Ortalama				767,11
B 100/150 + % 0.75 ELV	1	66,47	1	777,1	794,3
			2	811,5	
	2	66,81	1	748,2	737
			2	725,8	
	3	66,47	1	879,8	843,9
			2	808	
	Ortalama				791,73
B 100/150 + % 1.0 ELV	1	67,39	1	667,2	666,95
			2	666,7	
	2	67	1	607,2	598,8
			2	590,4	
	3	67,28	1	638,2	671,35
			2	704,5	
	Ortalama				645,70

Şekil 4.39’da katkı miktarı ve sıcaklık ile saf ve modifiye bitümlü karışım numunelerinin ITSM değerlerinin değişimi verilmiştir.



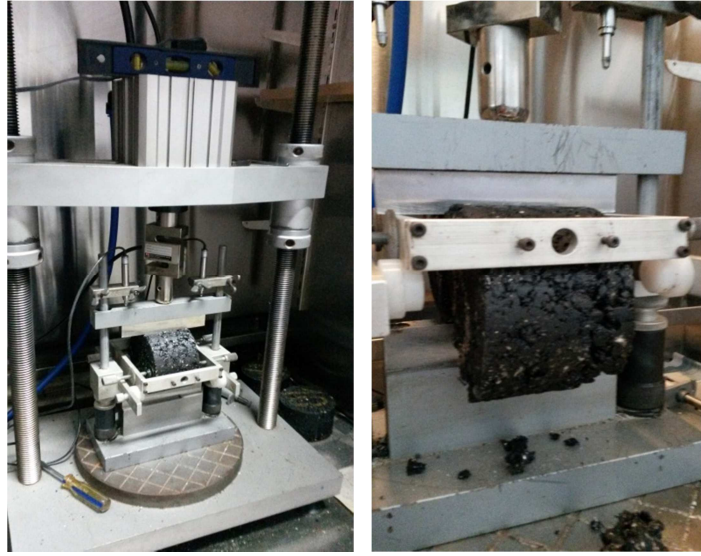
Şekil 4.39 Farklı sıcaklıklarda ITSM (MPa) değerleri

Tablo 4.23 incelendiğinde; karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin ITSM değerleri 20 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçlarında yaklaşık sırasıyla %14.25, 7.23 ve 10.73 artış göstermiştir. En yüksek ITSM değeri %0.5 Elvaloy Ret içeren modifiye karışımlarda görülmüştür. Tablo 4.24 incelendiğinde; 30 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçlarında karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) saf karışım numunelerine göre karışım numunelerinin ITSM değerleri yaklaşık sırasıyla %20.35, %24.21 ve %1.3 kadar artış göstermiştir. En yüksek ITSM değeri 30 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçlarında %0.75 Elvaloy Ret katkılı modifiye karışımlarda görülmüştür.

Sıcaklık arttıkça, viskoelastik özellikten dolayı karışımların sertlik değerlerinde azalma görülmüştür. Her iki sıcaklık değerindeki saf bitümlü karışıma göre modifiye karışımların ITSM değerlerindeki artış, karışımların kalıcı deformasyona karşı direncinin arttığını göstermektedir. Buna göre; Elvaloy Ret katkılı karışımlarda, trafik etkisiyle kaplamada oluşan ve yorulma çatlaklarına sebep olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı söylenebilir.

4.6.4. Dolaylı Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Saf ve Elvaloy Ret katkıli karışımlar üzerinde dolaylı çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 150 kPa gerilme seviyesi uygulanmıştır. İndirekt çekme yorulma deneyleri, 25 °C sıcaklıkta uygulanmış olup deneyden önce numuneler 2 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1.5 sn olarak alınmış bu sürenin 0.124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1.376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Deney uygulanan numune ve deneyden sonraki numunenin kırılmış hali Şekil 4.40'ta verilmiştir.



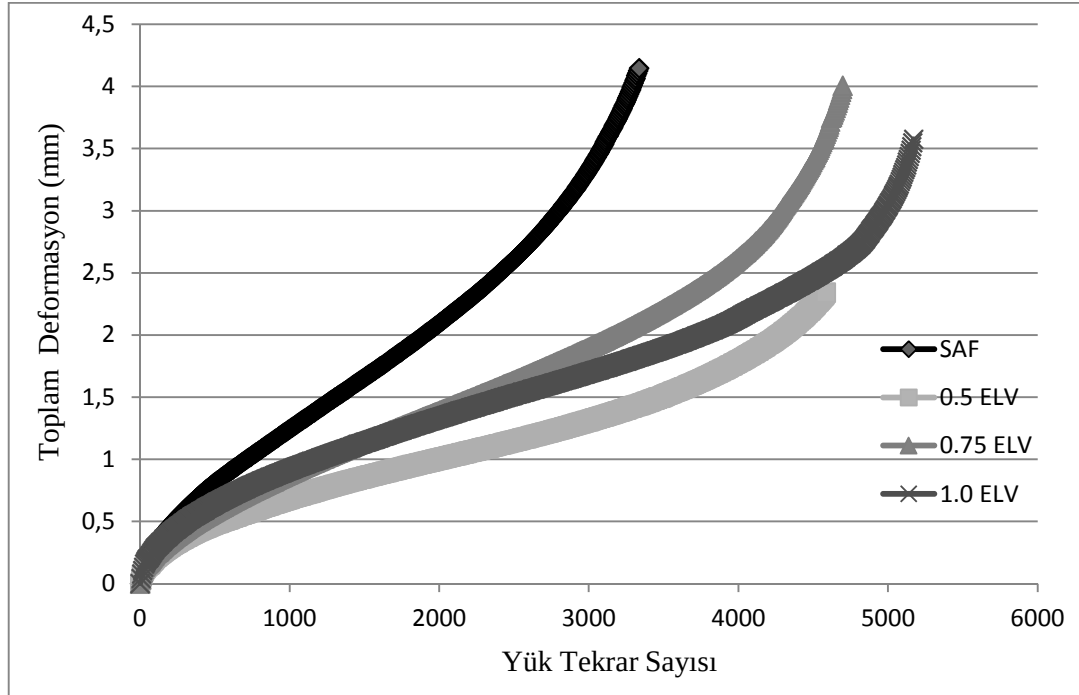
Şekil 4.40 Yorulma deneyi uygulanan numune

Yorulma deneylerinden elde edilen saf ve modifiye bitümlü karışımların deney sonuçları Tablo 4.25'te verilmiştir. Tablodaki yük tekrar sayısı ve deformasyon değerleri, her karışım türü için yapılan üç deney sonucunun ortalama değerleridir.

Tablo 4.25. Karışımların yorulma deney sonuçları

Karışım Türü	Yük Tekrar Sayısı	Deformasyon (mm)
B 100/150	3229	3,86
B 100/150 + %0.5 ELV	4579	2,33
B 100/150 + %0.75 ELV	4710	3,98
B 100/150 + %1.0 ELV	5836	4,04

Saf ve Elvaloy Ret katkılı modifiye karışım numunelerinin yük tekrar sayısı ve toplam deformasyon ilişkileri Şekil 4.41’de verilmiştir.

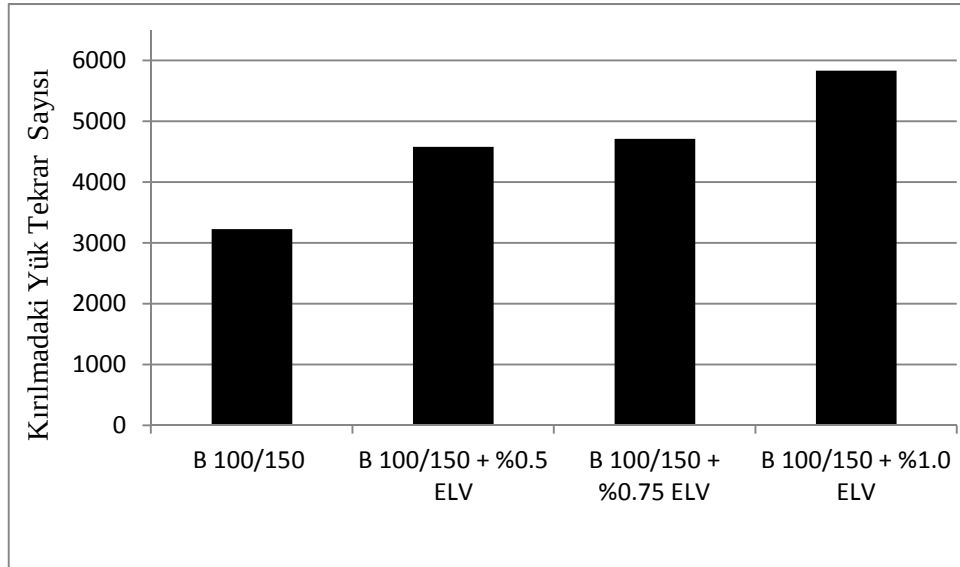


Şekil 4.41 Karışımların yük tekrarı- deformasyon ilişkisi

Şekil 4.41’de görülen eğriler üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde numunelerdeki hava boşluğu nedeniyle yük etkisiyle bir sıkışma meydana gelmekte ve deformasyon hızlı bir şekilde artmaktadır. İkinci bölümde deformasyon artış hızı lineer olarak devam etmekte ve üçüncü bölümde ise çatlak oluşumu ile birlikte deformasyon hızı tekrar artmaktadır. Karışımların çatlak ilerleme davranışlarının benzer olduğu görülmektedir. Zaten aynı katkı türü kullanıldığından bu sonuca

varılması kaçınılmazdır. Karışımların kırılmaya neden olan yük tekrar sayıları Şekil 4.42’de verilmiştir. Burada değerler küçükten büyüğe doğru katkı miktarları oranları da artan sıralı olarak verilmiştir. Bu nedenle grafiğin yatay ekseninden numunelerin performansları karşılaştırılabilmektedir. Buradaki değerler her karışım türü için üç deney sonucunun ortalama değerleridir.

Numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük yük tekrar sayısına B 100/150 saf bitümü ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise %1.0 oranda Elvaloy Ret içeren modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan katkı oranları artışıyla, (%0.5, 0.75, 1.0) saf bitümlü karışım numunelerine göre sırasıyla 1.42, 1.46 ve 1.80 kat daha fazla yük tekrar sayısı oluşmuştur (Şekil 4.42). Bu durum, Elvaloy Ret içeriğinin artmasıyla numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısı artmasına rağmen bitümlü sıcak karışımların esnekliğinin azaldığını dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.42 Karışım türü ve kırılmaya neden olan yükleme sayıları

Karışımları değerlendirmek amacıyla 2 mm deformasyondaki yük tekrar sayıları karşılaştırılmıştır. 1500 ms yük tekrar periyodunda B 100/150 saf bitümü ile hazırlanan karışımlarda 2 mm deformasyona neden olan yük tekrarının 1788 olduğu belirlenmiştir. %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarda Elvaloy Ret modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 2 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısının B 100/150 saf bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 2.39, 1.65 ve 2.76 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Yorulma deneyi uygulanmış numuneler Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43 Yorulma deneyi uygulanmış numuneler

4.6.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Dinamik sünme deneyi, saf ve Elvaloy Ret katkı içeren modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde UMATTA deney aleti kullanılarak uygulanmıştır. Her bir karışım türü için üç numune olmak üzere toplamda 12 numune deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.44). Deney 40 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Dinamik sünme deneyi 500 kPa gerilme altında ve 1000 ms. yük tekrar süresinde gerçekleşmiştir. Yük etki süresi ise 500 ms olarak seçilmiştir. Deneylere 5000. yük tekrarına kadar devam edilmiştir ve 5000 yük tekrarında deney sonlandırılmıştır. Bu tekrar sayısından önce bütün numunelerin üçüncü bölgeye geçtikleri görülmüştür. Deney uygulanan karışım numuneleri ve deney düzeneği Şekil 4.44'te verilmiştir. Dinamik Sünme deneyine ait sonuçlar ise Tablo 4.26'da verilmiştir.

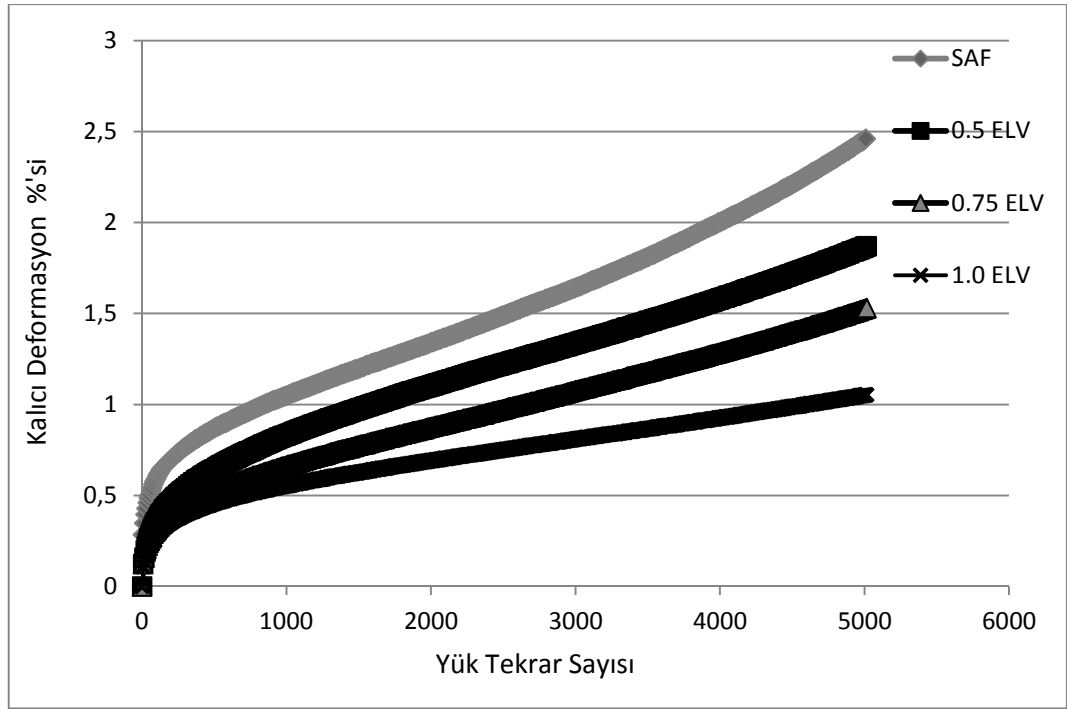


Şekil 4.44 UMATTA deney aleti ve sünme deneyi uygulanan numuneler

Tablo 4.26. Dinamik sünme deney sonuçları

Karışım Türü	Numune No	h_{ort} (mm)	Sünme Rijitliği S_m (MPa)	Akma Sayısı (FN)	Toplam Şekil Değiştirme %'si
B 100/150 SAF	1	66,14	20,21	2104	2,45
	2	66	19,09	1704	2,62
	3	66,05	20,05	1808	2,49
	Ortalama	66,06	19,78	1872	2,52
B 100/150+ %0.5 ELV	1	66,36	28,52	2752	1,86
	2	66,23	25,11	2085	1,35
	3	66,72	26,8	2939	1,68
	Ortalama	66,43	26,81	2592	1,63
B 100/150+ %0.75 ELV	1	66,49	32,27	2891	1,56
	2	66,31	32,68	2908	1,53
	3	66,23	31,88	2889	1,58
	Ortalama	66,34	32,28	2896	1,55
B 100/150+ %1.0 ELV	1	66,18	32,57	2986	1,52
	2	66,42	40,03	2918	1,27
	3	66,59	47,53	2856	1,08
	Ortalama	66,39	40,04	2920	1,29

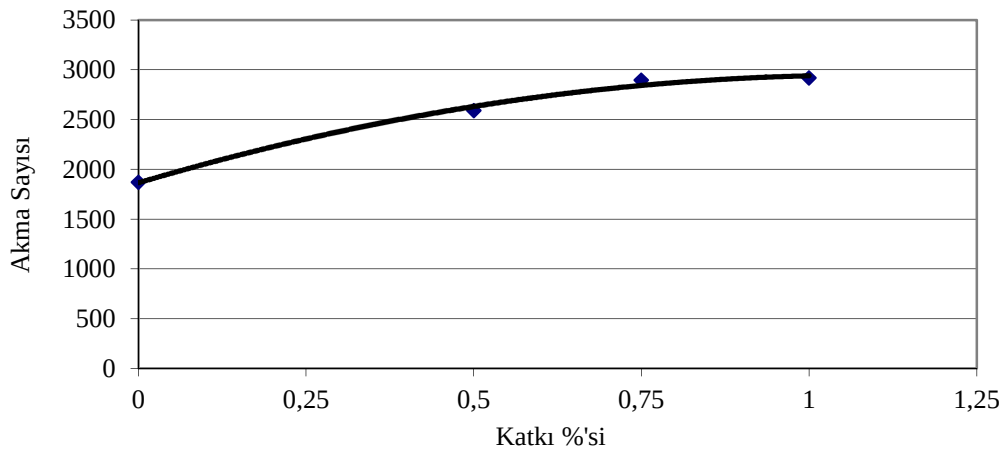
Saf ve Elvaloy Ret katkılı karışım numunelerinin kalıcı deformasyon yüzdesi ile uygulanan yük tekrar sayısı ilişkileri Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45 Yük tekrar sayısı- kalıcı deformasyon %'si ilişkisi

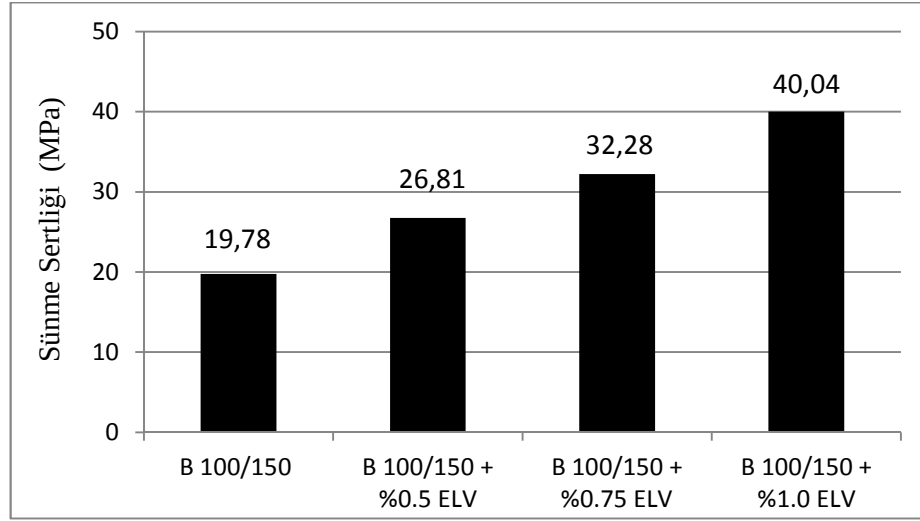
Numunelerdeki toplam şekil değiştirme %'lerinde, saf bitüme katkı ilavesi ile hazırlanan modifiye karışımlarda kalıcı deformasyona karşı bir dirence ve daha uzun servis ömrüne işaret eden bir azalışın olduğu sonucuna varılmıştır.

Karışım numunelerin akma sayıları incelendiğinde katkı oranı artışı ile arttığı görülmektedir. Akma sayısı tekerlek izi parametresine işaret ettiğinden, modifiye karışımların yüksek tekerlek yüklerine deforme olmadan daha uzun süre direnç göstereceği açıktır. Akma sayısının karışımdaki katkı yüzdesi ile değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.46 Akma sayısı (FN)- katkı %'si değişimi

40 °C sıcaklıkta dinamik sünme deneyine tabi tutulan saf ve modifiye bitümlü karışım numunelerinin sünme rijitliği (Sm) değerleri Şekil 4.47’de verilmiştir.



Şekil 4.47 Karışımların sünme rijitliği (Sm) değerleri

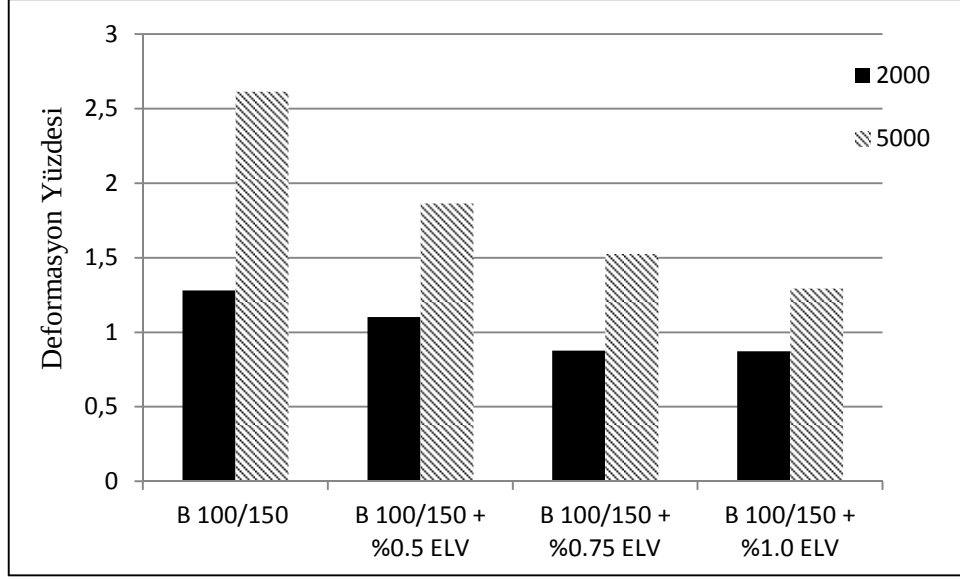
Şekil 4.47 incelendiğinde; karışımlarda Elvaloy Ret katkı oranı artışıyla (%0.5,0.75,1.0) saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin sünme rijitliği değerleri yaklaşık sırasıyla %35.54, %63.20 ve %102.43 artış göstermiştir. 40 °C sıcaklıkta en yüksek sünme rijitliği değerini %1.0 oranda Elvaloy Ret polimer katkı ilave edilerek hazırlanan modifiye bitümlü karışımlar göstermiştir. Bu durum, karışımların tekerlek izi veya uzun süre deformasyonlara karşı direncinin büyük artış gösterdiğini belirtmektedir.

Karışım numunelerin 2000. ve 5000. darbe sayılarındaki ortalama deformasyon yüzdeleri Tablo 4.27’de verilmiştir.

Tablo 4.27. Karışımların ortalama deformasyon yüzdeleri

Darbe Sayısı	Karışım Türü			
	B 100/150	B 100/150 + %0.5 ELV	B 100/150 + %0.75 ELV	B 100/150 + %1.0 ELV
	Ortalama Deformasyon %'si			
2000	1,280	1,102	0,876	0,872
5000	2,613	1,865	1,525	1,293

Saf ve modifiye bitümlü karışımların 2000. ve 5000. darbe sayısındaki deformasyon yüzdeleri Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.48 Darbe sayısı- deformasyon ilişkisi

Deney sonlandırıldığında toplam deformasyon yüzdelerinin hem saf hem de modifiye bitümlü karışımlarda ciddi bir oranda arttığı görülmüştür. Katkı oranı arttıkça deformasyon yüzdeleri azalmıştır. Buradan; modifiye karışım numunelerinde Elvaloy Ret katkı kullanımının deformasyon oluşumunu azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, Elvaloy Ret polimer kökenli katkı malzemesinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmanın deneysel ilk aşamasında, seçilmiş olan B 100/150 saf bitümlü bağlayıcısına %0.5, %0.75 ve %1.0 oranda Elvaloy Ret polimer katkı ilave edilerek B 100/150+ %0.5 ELV, B 100/150+ %0.75 ELV ve B 100/150+ %1.0 ELV olmak üzere üç farklı oranda modifiye bağlayıcılar elde edilmiş ve bu bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri değerlendirilmiştir.

Elvaloy Ret katkılı bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon değerlerinde katkı oranı artışıyla azalma, yumuşama noktalarında ise katkı oranı artışıyla artış meydana gelmiştir. Bu durum, Elvaloy Ret ilavesiyle bitümlü bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri değerlendirildiğinde; bağlayıcı sertliği arttıkça PI değerlerinin de arttığı dolayısıyla ısıya karşı hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Yaşlanma nedeniyle meydana gelen kütle kayıpları değerlendirildiğinde; Elvaloy Ret katkı kullanımı arttıkça kütle kaybında azalma görülmüştür. Bu durumda, bağlayıcılarda Elvaloy Ret'in kullanılması ile kaplamalarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olan bağlayıcı sertleşmesinin olumsuz etkilerinin ortadan kalktığı, dolayısıyla bağlayıcının elastikiyetinde bir azalmanın olmadığı görülmüştür.

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; saf bitüme Elvaloy Ret katkı ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde iki sınıf (12 °C) artış, tekerlek izi direncinde ise %234 kadar büyük artışlar olduğu, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ancak elastiklik özelliğinin arttığı ve çok yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmüştür.

Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; Elvaloy Ret ilavesiyle bağlayıcının düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf (6 °C) yükseldiği görülmüştür. Böylece düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

Dönel Viskozimetre (RV) deney sonuçlarına göre; Elvaloy Ret ilavesiyle

bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düştüğü ve daha sert bir kıvama geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca bağlayıcı penetrasyon değerlerindeki azalmaya bağlı olarak BSK'ların hazırlanmasında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerinde de bir artış görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında, saf ve Elvaloy Ret katkıli modifiye karışım numuneleri hazırlanarak Elvaloy Ret'in karışımların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Marshall Stabilite değerleri karşılaştırıldığında; en yüksek stabilite değerine koşullandırılmamış ve koşullandırılmış numunelerde sırasıyla %0.75 ve %1.0 oranında Elvaloy Ret polimer katkısı kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve AASHTO T-283 deneyleri sonucunda; ITS değerindeki en büyük artış miktarı; kuru karışım numuneleri için %0.5 Elvaloy Ret içeren karışımlarda, yaş numuneler için ise %0.75 Elvaloy Ret içeren modifiye karışımlarda görülmüştür. ITS değerlerinde ise en büyük artış %0.75 Elvaloy Ret katkıli modifiye karışımlarda görülmüştür. Buradan; Elvaloy Ret katkı ilavesiyle, modifiye karışımların adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiği, sertlik ve durabilitesinin arttığı, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin önemli ölçüde yükseldiği sonucuna varılmaktadır.

Dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi sonucunda; Elvaloy Ret katkıli karışımlarda, trafik etkisiyle kaplamanın altında oluşan ve yorulma çatlaklarına sebep olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı, rijitlik modülünün artmasıyla bitümlü kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma yeteneğinin iyileştiğini ifade etmek mümkündür.

Dolaylı çekme yorulma deneyi sonucunda; Elvaloy Ret modifiyeli karışımlardan yorulma dayanımı en yüksek olan karışımların %1.0 oranda katkı içeren karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Elvaloy Ret katkı oranı arttıkça karışım numunelerinde kırılma anındaki yük tekrar sayıları artmıştır, dolayısıyla daha geç deforme olmuştur. Bu demektir ki; katkı oranı arttıkça karışım numuneleri darbeye karşı daha fazla direnç göstermiştir, daha geç kırılmıştır.

Dinamik sünme deneyi sonucunda; Elvaloy Ret modifiyeli karışımların

sünme rijitliği (Sm) değerleri, katkı oranı artışıyla paralel olarak artış göstermiştir. En yüksek sünme rijitliğinin yapılan deneyde %1.0 Elvaloy Ret katkıli modifiye karışımlardan elde edildiği görülmüştür. Buna göre Elvaloy Ret katkıli karışımların, uzun süreli deformasyonlara karşı direncinin önemli artış gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil değiştirme %'lerinde, saf bitüme katkı ilavesi ile hazırlanan modifiye karışımlarda kalıcı deformasyona karşı bir dirence ve daha uzun servis ömrüne işaret eden bir azalışın olduğu sonucuna varılmıştır. Akma sayıları incelendiğinde, katkı oranı artışı ile arttığı görülmektedir. Akma sayısı tekerlek izi parametresine işaret ettiğinden, buradan karışımların yüksek tekerlek yüklerine deforme olmadan daha uzun süre direnç göstereceği sonucuna varılmıştır.

Bitüm ve karışım modifikasyonu ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunda; Elvaloy Ret'in bir katkı maddesi olarak karışımlarda kullanılması durumunda, bitüm ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle, sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, sertliğinin artmasına rağmen esneklik özelliğinin arttığı, nem hasarlarına karşı büyük direnç sağlandığı, kaplama yorulma dayanımının yükseldiği ve özellikle yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı büyük direnç oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, Elvaloy Ret ilavesiyle hazırlanan modifiye karışımların, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı bakım-onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha aza indireceğinden fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Kök, B.V., 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] Lav, A.H. ve Lav, M.A., 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
- [3] Yalçın, E., 2014. Filler Olarak Kireç Kullanımının Modifiye Bitümlerle Hazırlanan Karışımların Performansına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [4] Geçkil, T., 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [5] Francken, L., 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, 352p.
- [6] Nicholls, C., 1998. Asphalt Surfacing, E & FN Spon, pp. 68–79.
- [7] Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas, İstanbul.
- [8] Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım.
- [9] Avcı, E., Tığdemir, M., Özdemir, T., Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Esnek Üstyapı Kaplama Tabakalarında Performans Araştırması, İzmir Ulaşım Sempozyumu, 8 Aralık 2009.
- [10] Asfalt ve Uygulamaları, 2001. İSFALT Bilimsel Yayınları, No:1, İstanbul, 280 s.
- [11] İskender, E., 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [12] Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013. K.G.M. Yayınları, Ankara.
- [13] Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, K.G.M. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [14] Yelken, F., 2009. Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [15] Yılmaz, M., 2011. Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [16] Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E., 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, p. 107, Morgantown, West Virginia.
- [17] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R.,

- Antle, C.E. ve Sharma, M.G., 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, Strategic Highway Research Program, SHRP A-370, 197 p., National Research Council Washington, DC.
- [18] McGennis, R.B., Shuler, S. ve Bahia, H.U., 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, 104 p., Washington, DC.
- [19] Shell Bitüm El Kitabı, 2004, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.
- [20] <http://www.pavementinteractive.org/article/hveem-mix-design/>, Publish date: February 16, 2015.
- [21] ASTM D 1559–89, 1992, Standart Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Annual Book of ASTM Standards USA.
- [22] Gezer, B.B., 2009. Mersin İli Çelebili Köyü İçmeler Mevkiinde Yüzeyleyen Kireçtaşlarının Beton ve Asfalt Ayrası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [23] Öztürk E.A. ve Çubuk M.K., 2004. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 19, Sayı 2.
- [24] Zoorob, S.E. ve Suparna, 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.
- [25] Hınıslioğlu, S. ve Ağar, E., 2004. Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, Materials Letters, 58, 267-271.
- [26] Çolak, K.M., 2006. Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [27] Yılmaz, M. ve Kök, B.V., 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Süperpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(41), 811-819.
- [28] URL-4, http://www.mod.uk/NR/rdonlyres/2AED7CD6-ADE1-46A9-A290-9069A89F32CA/0/spec_13.pdf, Marshall Asphalt for Airfields, Ministry of Defence, Construction Support Team, England, Specification 13, 73 p., 01.05.2014.
- [29] Aksoy, A., Samlıoğlu, K., Tayfur, S. ve Özen, H., 2005. Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 19 (1), 11-18.

- [30] Alshamsi, K.S., 2006. Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom, 226p.
- [31] Lavin, P.G., 2003. Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
- [32] Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007. Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 179-189.
- [33] Malkoç, G., 2002. Yol üst yapılarında kullanılan modifiye asfaltlar ve modifiye bitüm şartnamesi, KGM Teknik Araştırma Dairesi Teknik Not.
- [34] Şengöz, B., 2007. Polimer Modifiye Bitümlerle Elde Edilen Sıcak Karışımların Reolojik ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Görüntü Analizi Yöntemlerinin Kullanılması, 104M559 Tübitak Projesi, İzmir.
- [35] Whiteoak, D. ve Read, J., 2003. The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.
- [36] Çeloğlu, M.E., 2013. Farklı doğal asfaltların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37] <http://www.51pla.com/uploadpic/2012/01/04/20120104172303839554.jpg>
- [38] M.W. Witczak, I. Hafez., and X. Qi., Laboratory Characterization of Elvaloy Modified Asphalt Mixtures, Vol 1. Technical Report, June 1995, pp 1-1.
- [39] Keyf, S. ve Özen, H., 2004. Terpolimerle Bitüm Modifiyesi Test Sonuçlarının İncelenmesi, UKMK 6, 6.Ulusal Kim. Müh. Kong., KT -117.
- [40] http://www2.dupont.com/Elvaloy/en_US/assets/downloads/elvaloy_4170.pdf Erişim Tarihi: Aralık 26, 2014].
- [41] DuPont Elvaloy, Özellikleri, Gerekli Ekipman ve Üretim Talimatnamesi.
- [42] North Central Asphalt User/Producer Group Meeting Monona Terrace, Madison, WI February 4-5, 2009.
- [43] Walkering, S.D. ve Vonk, W.C., 1992. Cariflex TR in Bitumen for Asphalt Mixes: Improved Elastic Recovery and Higher Performance, Thermoplastic Rubbers Technical Manual, Koninklijke Shell Laboratorium, Amsterdam, Netherlands, April.
- [44] Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. ve Rollings, R., 1993. Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, Transportation Research Record, 1417, 178-86.

- [45] Lu, X. ve Isacsson, U., 1997. Rheological characterization of styrene-butadienestyrene copolymer modified bitumens, *Journal of Construction and Building Materials*, 11(1), 23-32.
- [46] Jian-Shiuh Chen, P.E. ve Min-Chih, L., Ming-Shen, S., 2002. Asphalt Modified by Styrene- Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, *Journal of Materials In Cıvıl Engineering*, May/June.
- [47] Mostafa A.E., Gerardo W .F. ve Imad L.A., 2003. Quantitative effect of elastomeric modification on binder performance at intermediate and high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, No. 1, February 1, 32-40.
- [48] Tığdemir, M. ve Kalyoncuoğlu, Ş.F., 2005. SBS-Elastomer Katkılı Asfalt Betonunda Karışımlarında Plastik Deformasyon Davranışı, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühensiliği Sorunları Kongresi*, Antalya.
- [49] Kumar, P., Mehndiratta, H.C. ve Singh, V., 2008. "Use of Fly Ash In Bituminous Layer of Pavement", *Indian Highways*, New Delhi, India, 41-50.
- [50] Yılmaz, M. ve Kök, B.V., 2008. Stiren-Butidien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Süperpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlene bilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 23(41), 811-819.
- [51] Şengöz, B. ve Işıkyakar, G., 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-905.
- [52] M. Witczak, Yol ile İlgili Basınç Zayıflıkları Makalesi, Maryland Üniversitesi ABD, (DuPont).
- [53] Billings, Maryland Üniversitesi, ABD.
- [54] Terrel, R.L., 1989. "Asphalt Modifiers," A User Manual for Additives and Modifiers in Hot Mix Asphalt, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland.
- [55] Keyf, S. ve Özen H. Terpolimerle Bitüm Modifiyesinde Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi Çalışması.
- [56] A. G. Güngör, A. Sağlık, F. Orhan ve E. A. Öztürk, 2009. Polimer Modifiye Bitümlerin Süperpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- [57] Patrick Lavin, 2003. Binder Performance. *Asphalt Conctractor*, September.
- [58] Katz, G., Ghana Institution of Engineers (GhIE), Generated 26 October, 2014.
- [59] Yıldırım, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) ,66-72.
- [60] F. Ranjbaran et al., The novel Elvaloy 4170/functionalized multi-walled carbon nanotubes mixed matrix membranes: Fabrication, characterization and

gas separation study, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers (2014).

- [61] Kashif Ahmed et al. /Procedia Engineering 77 (2014), Experimental Investigation of Strength and Stiffness Characteristics of Hot Mix Asphalt, Fourth International Symposium on Infrastructure Engineering in Developing Countries, IEDC 2013.
- [62] Shirodkar et al. /Construction and Building Materials 34 (2012) p. 504-511, Characterization of creep and recovery curve of polymer modified binder.
- [63] Topal, Fuel Processing Technology 91 (2010), 45-51 Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens.
- [64] Gonzales, O., Munoz, M.E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F.J., Partal, P., 2004. Rheology and stability of bitumen/EVA blends, European Polymer Journal 40, 2365-2372.
- [65] İ. Sönmez, M.T. Deniz, vs. Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi ve Performans Üstünlükleri Çalışması, 6. Ulaştırma Kongresi, Mayıs 2005.
- [66] Koral, A.F., 2012. Aynı Performans Seviyesine Sahip Bağlayıcılarla Hazırlanan Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve Yorulma Ömürlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [67] Önal, M.A., Kahramangil, M.,1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, K.G.M Tek. Arşt. D. Bşk., Ankara.
- [68] Asfalt El Kitabı, 2002, İsfalt Bilimsel Yayınları, No : 2, 573 s.
- [69] Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., Gökçe, A.F., 1990. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, K.G.M. Tek. Arşt. D. Bşk., Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Maksut SELOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Malazgirt-11.03.1988

Adres: Sürsürü Mah. M. Cemiloğlu Cad. No:14/1 Merkez/ELAZIĞ

E-Posta: maksutseloglu@gmail.com

Lisans: Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2007-2011).

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı (2011-2015).

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Park 44 Yapı Denetim Ltd. Şti. İnşaat Kontrol Mühendisi (12/2011-03/2013).

Milidya Yapı Denetim Ltd. Şti. İnşaat Kontrol Mühendisi (03/2013-06/2013).

Sar-Van Yapı Denetim Ltd. Şti. İnşaat Proje ve Uygulama Kontrol Mühendisi (07/2013-devam ediyor).