





**EGE ÜNİVERSİTESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇEŞİTLİ MUMLARIN ASFALT  
MODİFİKASYONUNDA KULLANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Baurzhan KULTAYEV**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Perviz AHMEDZADE**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 624.04.00**

**Sunuş Tarihi :12.03.2014**

**E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Bornova-İZMİR**

**2014**

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**ÇEŞİTLİ MUMLARIN ASFALT  
MODİFİKASYONUNDA KULLANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Baurzhan KULTAYEV**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Perviz AHMEDZADE**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 624.04.00**

**Sunuş Tarihi :12 .03.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**

Baurzhan KULTAYEV tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Çeşitli Mumların Asfalt Modifikasyonunda Kullanabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12.03.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

<b>Jüri Başkanı</b>	: .....	.....
<b>Raportör Üye</b>	: .....	.....
<b>Üye</b>	: .....	.....

# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çeşitli Mumların Asfalt Modifikasyonunda Kullanabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12 / 03 / 2014

Baurzhan KULTAYEV

**ÖZET****ÇEŞİTLİ MUMLARIN ASFALT MODİFİKASYONUNDA  
KULLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

KULTAYEV, Baurzhan

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Perviz AHMEDZADE

Mart 2014, 156 sayfa

Bu tez çalışmasında, FT-Parafin (FT)/Sasobit<sup>®</sup>, Polietilen Mum (PE) ve Microwax (MW) gibi çeşitli ticari mumlar katkı malzemesi olarak seçilmiş ve bu malzemelerin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar (BSK) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, bağlayıcı olarak kullanılan B 160/220 penetrasyonlu bitüme farklı oranlarda (%3, %4, %5 ve %6) ticari mumlar eklenerek modifiye işlemi gerçekleştirilmiş ve mum katkıların bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri çeşitli deneyler ile incelenmiştir. Bu bağlamda, penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve depolama stabilitesi gibi geleneksel deneylerin yanı sıra Superpave şartnamesine uygun olarak kısa süreli yaşlandırma (RTFOT), dinamik kayma reometresi (DSR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri saf ve mum katkılı bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Derebeton AŞ'den temin edilen, kalker türü agrega üzerinde elek analizi yapılarak Superpave yöntemine uygun bir gradasyon elde edilmiş ve agrega malzemesinin kaba, ince ve filler olarak özgül ağırlıkları ayrı ayrı bulunmuştur. Saf ve mum katkılı bağlayıcıların Marshall karışım dizaynına göre optimum bağlayıcı içerikleri tespit edilmiştir. Optimum bitüm içeriklerinde yapılan karışım numuneleri üzerinde Marshall Stabilite ve nem hasarına karşı direnç deneyleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, B 160/220+%5FT katkılı bağlayıcının, karışımın stabilitesini, PG sınıfı, yumuşama noktasını arttırdığı, penetrasyonu ve karıştırma ile sıkıştırma sıcaklıklarını ise azalttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Wax, FT Parafin (Sasobit<sup>®</sup>), Polietilen Mum, Microwax, Dönel Viskozimetre (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Depolama Stabilitesi.

**ABSTRACT**

**INVESTIGATION USING OF VARIOUS WAXES**

**IN ASPHALT MODIFICATION**

KULTAYEV, Baurzhan

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Periz AHMEDZADE

March 2014, 156 pages

In this study, several types of wax such as FT-Paraffin (FT)/Sasobit<sup>®</sup>, Polythene Wax (PE) and Microwax (MW) were used as additives in bitumen and hot mix asphalt. The effects of these materials on hot mix asphalt were investigated. To that end, different wax modified bitumens were prepared with several proportions of 3, 4, 5 and 6 %. Original bitumen having B 160/220 penetration and wax modified bitumens have been tested with different test methods in order to study physical properties of the bitumens. In this regard, conventional tests such as penetration, softening point, specific gravity, and storage stability as well as Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) tests such as Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), Dynamic Shear Rheometer (DSR), and Rotational Viscometer (RV) on base and modified bitumens were performed. In order to conduct multiple tests on hot mix asphalt, limestone aggregates obtained from Derebeton AŞ were used in this study. Many tests like sieve analyses and gradation (according to Superpave gradation), and specific gravity have been carried out. Optimum bitumen content of base and wax modified bitumens prepared with Marshall mix design were determined. Marshall Stability and the resistance to moisture damage experiments were made on the prepared samples of the mixes at optimum bitumen content. As a result, the modified bitumen type of B 160/220+0%5FT has increased in mixes stability, PG grade, softening point, and has reduced penetration, and temperatures of mixing and compaction.

**Key Words :** Wax, FT Paraffin (Sasobit<sup>®</sup>), Polythene Wax, Microwax, Rotational Viscometer (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Storage Stability.

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sűresince gerekli verilerin saėlanmasında ve tűm araŐtırma iŐlemlerin gerek pratik gerekse teorik olarak tamamlanmasının her safhasında bűyűk bir ilgi ve sabırla, destek ve gűrűŐlerini esirgemeyen deėerli danıŐman hocam, Doç. Dr. Perviz AHMEDZADE'ye ūkranlarımı sunarım. Ayrıca alıŐma sırasında gűrűŐ ve űnerileri ile çalıŐmaya katkıda bulunan Ar. Gűr. Taylan GŪNAY'a ve UlaŐtırma Anabilim Dalı doktora űėrencisi ve arkadaŐım Omar Qudah'a teŐekkűrű bir borç bilirim.

**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	viii
TEŞEKKÜR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
1. GİRİŞ .....	1
2. ESNEK KAPLAMALARIN MODİFİKASYONU .....	3
2.1 Esnek Kaplamalarda Modifiyerlerin Kullanım Amacı.....	3
2.2 Esnek Kaplamaların Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri.....	5
2.3 Kullanılan Katkı Tiplerinin Esnek Kaplamalar Üzerindeki Etkileri .....	8
2.4 Ticari Mumlar .....	10
2.4.1 Türleri ve üretim şekilleri.....	10
2.5 Mum İçeren Bitümler.....	14
2.5.1 Mum ve bitüm içindeki mum .....	14
2.5.2 Bitümdeki mum içeriğinin belirlenmesi ve sınıflandırılması.....	16
2.5.3 Bitümün mum içeriği .....	17
2.5.4 Mumun bitüm üzerindeki etkileri .....	18
2.5.5 Ticari mumların katkı maddesi olarak kullanılması .....	20
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA (BSK) KULLANILAN MALZEMELER.....	21
3.1 BSK'larda Kullanılan Agregalar .....	21
3.1.1 Agregaların fiziksel özellikleri .....	21
3.2 BSK'larda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar .....	28
3.2.1 Bitümün özellikleri .....	28
4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR .....	56
4.1 BSK'ların Özellikleri .....	56

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.1 BSK'ların stabilitesi.....	56
4.1.2 BSK'ların rijitliği.....	57
4.1.3 Bitümlü sıcak karışımların durabilitesi.....	57
4.1.4 BSK'ların yorulma mukavemeti.....	57
4.1.5 BSK'ların esnekliği.....	58
4.1.6 BSK'ların geçirimsizliği.....	58
4.1.7 BSK'ların kayma direnci.....	58
4.2 Materyal ve Metot.....	59
4.2.1 Marshall karışım dizayn metodu.....	59
4.2.2 Nem hasarına karşı direnç deneyi.....	63
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	65
5.1 Malzeme Özelliklerini Belirlemek Amacıyla Yapılan Deneyler.....	65
5.1.1 Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	65
5.1.2 Agrega gradasyonunun belirlenmesi.....	65
5.1.3 Agregaların özgül ağırlıklarının belirlenmesi.....	67
5.1.4 Bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler.....	67
5.1.5 Katkı maddelerinin seçimi.....	67
5.1.6 Modifiye işleminin gerçekleştirilmesi.....	70
5.1.7 Saf ve modifiye karışımlar üzerinde yapılan geleneksel deneyler.....	71
5.1.8 Depolama stabilitesi deneyi.....	73
5.1.9 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT).....	77
5.1.10 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi.....	84
5.1.11 Dönel viskozimetre (RV) deneyi.....	94
5.2 Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler.....	105
5.2.1 Optimum bitüm içeriklerinin (OBİ) belirlenmesi.....	105
5.2.2 Nem hasarına karşı direnç deneyi.....	117
5.3 Karışımların Maliyet Hesabı.....	123
6. SONUÇ.....	125
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	128

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
ÖZGEÇMİŞ.....	134
EKLER.....	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bitümdeki mumun şematik resmi.....	16
3.1. Agregaların gradasyon sınıflandırılması.....	22
3.2. Penetrasyon deney aleti.....	32
3.3. Yumuşama Noktası Deneyi.....	34
3.4. Laboratuvarımız tarafından üretilen depolama stabilitesi tüpü.....	36
3.5. Bitüm özgül ağırlığı kabı.....	37
3.6. Dönel ince film etüvü (RTFOT) aleti şematik görünüşü.....	38
3.7. Dönel İnce film etüvü (RTFOT) aleti.....	38
3.8. DSR (Anton Paar Smart Pave Plus 301) aletinin genel görüntüsü.....	40
3.9. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli.....	41
3.10. DSR bitüm numunesi.....	44
3.11. DSR bitüm numuneleri; a) Taşmış şekli, b) Düzeltilmiş şekli, c) Deneye hazır şekli.....	48
3.12. “Brookfield DV-II+Pro EXTRA” RV Cihazının ana görüntüsü (a), Cihazın ana ekranı (b), Brookfield termosel aleti (c).....	49
3.13. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması.....	50
3.14. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem.....	51
3.15. Viskozimetre ve mil bağlantısı.....	54
3.16. Dönel viskozimetre (RV) göstergesi.....	54
4.1. Karıştırıcı.....	59
4.2. Marshall tokmağı.....	59
4.3. Tokmaktan çıkarılarak soğumaya bırakılan numune (a), Soğuduktan sonra kalıptan çıkarılan numune (b).....	60
4.4. Marshall stabilite ve akma aleti.....	62
5.1. FT-parafin mumu.....	68
5.2. Polietilen mumu.....	69
5.3. Microwax mumu.....	69
5.4. Mikser (a), onun özel ısıtıcı aleti (b) ve kap (c) gösterilmiştir.....	70
5.5. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) aleti (a) ve şişelerin yerleştirilmesi (b).....	77

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. RTFOT Deneyi yapılışı (a) ve şişelerin deneyden önceki ve sonraki görünüşü (b).....	78
5.7. Anton Paar Smart Pave Plus 301 dinamik kayma reometresinin genel görünüşü.....	85
5.8. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a), alt plakaya yerleştirilmesi (b) ve üst plakanın deney konumuna getirilmesi (c) .....	85
5.9. “Brookfield DV-II+Pro EXTRA” viskozimetre cihazının ana görüntüsü .....	95
5.10. Numunelerin manometre ile doygun hale getirilmesi.....	119

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
2.1. Karışıma Eklenen Katkı Maddeleri .....	6
2.2. Bağlayıcıya Eklenen Katkı Maddeleri .....	6
2.3. K.G.M. Modifiye Bitüm Şartname Limitleri.....	7
2.4. Farklı tipteki modifiyerlerin faydaları.....	8
3.1. Ülkemizde kullanılan bitümlerin yeni penetrasyon sınıflandırılması.....	29
3.2. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri.....	47
5.1. Kullanılan agrega gradasyonu .....	49
5.2. Kullanılan agregaların genel özellikleri .....	66
5.3. Ticari numların fiziksel özellikleri .....	67
5.4. Saf ve katkılı modifiye bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri.....	68
5.5. Depolama stabilitesi deney sonuçları.....	71
5.6. FT modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları .....	74
5.7. PE modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları .....	78
5.8. MW modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.....	78
5.9. Orijinal ve RTFO deneyine tabi tutulan bitümlerin penetrasyonları ve yumuşama noktaları.....	79
5.10. Orijinal ve yaşlandırılmış saf bitüm numunesinin DSR deney sonuçları ....	81
5.11. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3FT numunesinin DSR deney sonuçları ....	86
5.12. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4FT numunesinin DSR deney sonuçları ....	87
5.13. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5FT numunesinin DSR deney sonuçları. ...	87
5.14. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6FT numunesinin DSR deney sonuçları. ...	88
5.15. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3PE numunesinin DSR deney sonuçları. ...	88
5.16. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4PE numunesinin DSR deney sonuçları. ...	90
5.17. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5PE numunesinin DSR deney sonuçları ....	90
5.18. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6PE numunesinin DSR deney sonuçları ....	90
5.19. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3MW numunesinin DSR deney sonuçları..	91
5.20. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4MW numunesinin DSR deney sonuçları..	92
5.21. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5MW numunesinin DSR deney sonuçları. .	92

## TABLOLAR DİZİNİ (devam)

Tablo	Sayfa
5.22. Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6MW numunesinin DSR deney sonuçları. .	93
5.23. Saf ve FT Parafin katkılı modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri.....	93
5.24. Saf ve PE katkılı modifiye bağlayıcılarının viskozite değerleri.....	95
5.25. Saf ve MW katkılı modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri .....	99
5.26. B 160/220 bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler .....	102
5.27. B 160/220+%5FT bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerle.....	106
5.28. B 160/220+%6PE bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler .....	109
5.29. Optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler.....	111
5.30. Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin fiziksel özellikleri .....	114
5.31. Şartlandırılmamış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri.....	117
5.32. Şartlandırılan karışım numunelerin doygunluk dereceleri.....	118
5.33. Kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve oranları (ITSR) .....	119

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.2. Viskoelastik davranış .....	3
3.3. Gerilme- deformasyon ilişkileri: (a) Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme- deformasyon ilişkisi, (b) Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	4
3.4. Kayma modülünün bileşenleri .....	23
3.5. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi .....	42
4.1. Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri .....	45
5.1. Kullanılan agrega gradasyon grafiği .....	46
5.2. Saf ve FT modifiyeli bitümlerinin penetrasyon, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi sonuçları .....	50
5.3. Saf ve PE modifiyeli bitümlerinin penetrasyon, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi sonuçları .....	62
5.4. Saf ve MW modifiyeli bitümlerinin penetrasyon, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi sonuçları .....	66
5.5. FT modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı .....	72
5.6. PE modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı .....	72
5.7. MW modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı. 72	72
5.8. FT modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı.....	74
5.9. PE modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı.....	75
5.10. MW modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı .....	75
5.11. Yaşlanmanın etkisiyle FT katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı .....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.12. Yaşlanmanın etkisiyle PE katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı .....	76
5.13. Yaşlanmanın etkisiyle MW katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı .....	76
5.14. Yaşlanmanın etkisiyle FT katkılı bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.....	79
5.15. Yaşlanmanın etkisiyle PE katkılı bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.....	79
5.16. Yaşlanmanın etkisiyle MW katkılı bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri .....	80
5.17. Yaşlanmanın etkisiyle FT katkılı bağlayıcılarda meydana gelen yumuşama noktası değişiklikleri.....	81
5.18. Yaşlanmanın etkisiyle PE katkılı bağlayıcılarda meydana gelen yumuşama noktası değişiklikleri.....	82
5.19. Yaşlanmanın etkisiyle FT katkılı bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.....	82
5.20. Saf ve FT Parafin İle modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.....	83
5.21. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	83
5.22. B+%3FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	96
5.23. B+%4FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	97
5.24. B+%35FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	97
5.25. B+%6FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	97
5.26. Saf ve PE ile modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.....	98
5.27. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	98
5.28. B+%3PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	99
5.29. B+%4PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	100
5.30. B+%5PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	100
5.31. B+%6PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	100

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.59. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin akma miktarlarının kıyası.....	101
5.32. Saf ve Microwax ile modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.....	101
5.33. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	102
5.34. B+%3MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	103
5.35. B+%4MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	103
5.36. B+%5MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	103
5.37. B+%6MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.....	104
5.38. B 160/220 kullanılan numunelerde Dp - % bitüm ilişkisi.....	104
5.39. B 160/220 kullanılan numunelerde Vh - % bitüm ilişkisi.....	106
5.40. B 160/220 kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.....	107
5.41. B 160/220 kullanılan numunelerde Vf - % bitüm ilişkisi.....	107
5.42. B 160/220 kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.....	107
5.43. B 160/220 kullanılan numunelerde Stabilite - % bitüm ilişkisi.....	108
5.44. B+%5FT kullanılan numunelerde Dp - % bitüm ilişkisi.....	108
5.45. B+%5FT kullanılan numunelerde Vh - % bitüm ilişkisi.....	109
5.46. B+%5FT kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.....	109
5.47. B+%5FT kullanılan numunelerde Vf - % bitüm ilişkisi.....	110
5.48. B+%5FT kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.....	110
5.49. B+%5FT kullanılan numunelerde Stabilite - % bitüm ilişkisi.....	110
5.50. B+%6PE kullanılan numunelerde Dp - % bitüm ilişkisi.....	111
5.51. B+%6PE kullanılan numunelerde Vh - % bitüm ilişkisi.....	112
5.52. B+%6PE kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.....	112
5.53. B+%6PE kullanılan numunelerde Vf - % bitüm ilişkisi.....	112
5.54. B+%6PE kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.....	113
5.55. B+%6PE kullanılan numunelerde Stabilite - % bitüm ilişkisi.....	113
5.56. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin stabilite kıyası.....	114
5.57. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin özgül ağırlık kıyası.....	115

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.58. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin boşluk oranı kıyası .....	115
5.60. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin asfaltla dolu boşluk oranı kıyası.....	115
5.61. Üç farklı bağlayıcı ile OBİ’de hazırlanan numunelerin agregalar arası boşluk oranı kıyası.....	116
5.62. Kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değişimi .....	120
5.63. Numunelerin dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) değişimi.....	120

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
FT	: Fischer Trops
PE	: Polietilen
MW	: Microwax
Superpave	: Superior Performing Asphalt Pavement (Üstün Performanslı Asfalt Kaplama)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
DSC	: Dinamic Scanning Calorimeter (Dinamik Taramalı Kalorimetre)
RTFOT	: Rotational Film Oven Test (Dönel İnce Film Etüvü)
DSR	: Dinamic Shear Rheometer (Dinamik Kesme Reometresi)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basıncılı Yaşlandırma Kabı)
RV	: Rotational Vizkozimeter (Dönel Viskozimetre)
ITSR	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
ITS <sub>yaş</sub>	: Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti
ITS <sub>kuru</sub>	: Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
$G^*/\sin \delta$	: Tekerlek İzi Parametresi
OBİ	: Optimum Bitüm İçeriği
F(B 160/220)	: Saf B 160/220 Bağlayıcısının 1 Ton Karışım İçerisindeki Bedeli
$F_{\text{karışım}}(B+\%6PE)$	: B+%5FT Bağlayıcısının 1 Ton Karışım İçerisindeki Bedeli
$F_{\text{karışım}}(B+\%5FT)$	: B+%6PE Bağlayıcısının 1 Ton Karışım İçerisindeki Bedeli

## 1. GİRİŞ

Kaplama tabakasında kullanılan bağlayıcı cinsine göre yol üstyapıları; esnek, rijit ve kompozit olarak üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Bağlayıcı olarak bitümlü malzeme kullanılan üstyapı çeşidine, esnek yol üstyapısı denilmektedir. Esnek yol üstyapıları, alttan üste doğru alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Üstyapı içerisindeki her bir tabakanın görevi, çeşitli iklim şartlarında, uygulanan gerilmeleri kendi bünyesi içerisinde deformasyona maruz kalmadan bir alt tabakaya aktarmaktır. Bu tabakalarda kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri, karşıladıkları gerilmelere bağlı olarak aşağıdan yukarıya doğru artmaktadır. Buna bağlı olarak, her bir tabakanın maliyeti de altındaki tabakaya göre daha yüksek olmaktadır.

Esnek kaplamalar, uygulandıkları yolların trafik hacimlerine göre; yüzeysel, macadam, road-mix, plant-mix ve bitümlü sıcak karışimli yollar gibi çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Bitüm ve agreganın her ikisinin de ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilen karışımlara bitümlü sıcak karışımlar (BSK) denilmektedir. Bitümlü sıcak karışım bitüm ve agrega olmak üzere iki ana bileşenden oluşan üç fazlı bir sistemdir. Agrega katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar da gaz fazını oluştururlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm, termoplastik ve viskoelastik bir malzemedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Bitümün bu özellikleri bitümlü karışımlara da yansıdığı için, kaplamalarda bir takım bozulmalar meydana gelmektedir. Örneğin; düşük sıcaklıklarda sertleşerek rijitliği artan kaplama plastik deformasyonlara karşı iyi mukavemet gösterirken, ayrışmalara ve çatlamalara karşı mukavemetini koruyamaz. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda stabilite büyük ölçüde azalmakta, tekerlek izi oluşumu, ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelmektedir (Perviz, A. ve Ahmet, B. G., 2009).

İlerleyen teknolojiye bağlı olarak, ağır taşıtların geliştirilmesi ve bu taşıt sayılarındaki artış, yolların servis kabiliyetinin azalmasına ve rehabilitasyon

tarihinden daha önce bakım yapılmasına neden olmaktadır. Bu bozulmaların giderilmesi ve ilerleyen dönemde kaplamanın gelen yükleri taşıyabilmesi amacıyla kaplamanın kalınlığını arttırmak bu olumsuzlukları ortadan kaldırmakta ancak toplam maliyetin yükselmesine neden olmaktadır. Katkı maddeleri kullanarak karışımın özelliklerinin iyileştirilmesi bu ek maliyeti ortadan kaldırmanın bir yoludur (K.G.M. Yayınları, 2004).

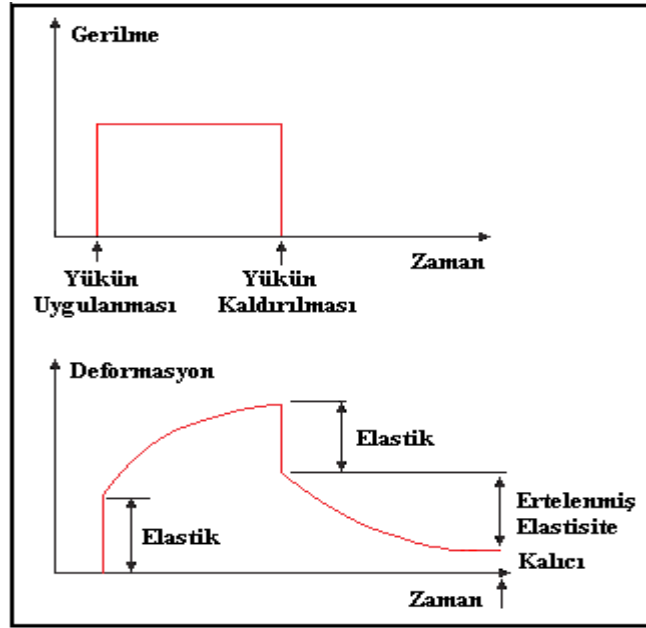
Bitümün özelliklerini iyileştirerek kaplama ömrünü ve performansını arttırmak amacıyla genellikle polimer kökenli modifiye katkıları kullanılmaktadır. Bunların yanında ABD, İsveç, Rusya, Kanada ve Almanya gibi bazı gelişmiş ülkelerde doğal mumun farklı türleri de kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, fiziksel ve kimyasal yapılarıyla birbirinden farklılık gösteren, halk arasında ticari mumlar olarak bilinen modifiyerler Öztin Kimya Anonim Şirketi'nden temin edilerek (FT-parafinin (Sasobit), Polietilen mumun ve Microwax) bitüm bağlayıcısı ve bitümlü sıcak karışımlarda bir katkı maddesi olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır.

## 2. ESNEK KAPLAMALARIN MODİFİKASYONU

### 2.1 Esnek Kaplamalarda Modifiyerlerin Kullanım Amacı

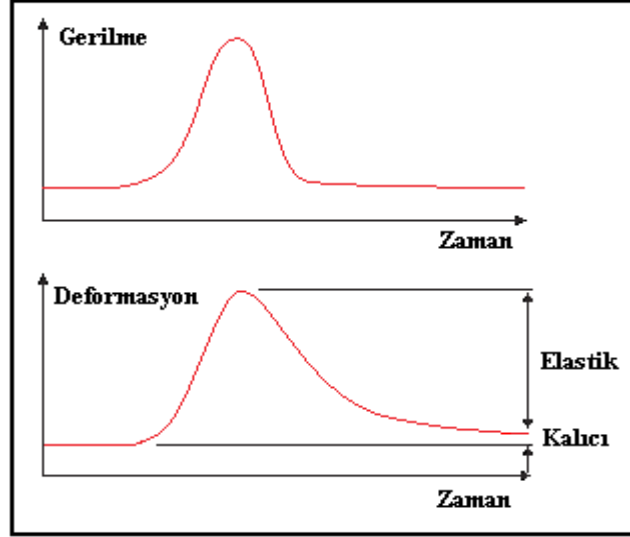
Esnek yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik göstermektedir. Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Genel olarak, asfalt kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir.



**Çizelge 2.1.** Uygulanan statik yük sonucu oluşan gerilme ve deformasyonların zamana bağlı olarak değişimi.

Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani tepkiyi (deformasyonu), yük kaldırılıncaya kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin visko-elastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla

elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zamanla ‘ertelenmiş elastisite’ adı verilen bir kısım geri dönüşüm daha elde edilmektedir. Sonuç olarak, geri kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



**Çizelge 2.2.** Uygulanan dinamik yük sonucu oluşan gerilme ve deformasyonların zamana bağlı olarak değişimi.

Çizelge 2.2’de, bitümlü sıcak karışımların hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekerrürü sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.

Bitüm modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya BSK’nın farklı sıcaklıklardaki özelliklerine aksi tesirde bulunmadan, yüksek sıcaklık değerlerinde kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı arttırmaktır. Bunun için birinci yol, BSK’nın toplam visko-elastik deformasyonunu azaltmak amacıyla bitümü sertleştirmek, ikinci yol ise bitümün viskozitesinin düşürülmesi amacıyla bitüm içerisindeki elastik ögelerin oranını arttırmaktır. Bitüm sertliğinin arttırılması, aynı zamanda BSK’nın da sertliğinin artmasını sağlamaktadır. Bu sayede kaplama dayanımında, malzemelerin yük dağıtma yeteneğinde ve

kaplamadan hedeflenen dizayn ömründe artış elde edilebilmektedir. Aynı etki kaplama tabakaları kalınlıklarının arttırılmasıyla da sağlanabilmektedir. Ancak, bu yöntem ilk inşaat masrafının yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitüm bünyesindeki elastik öge oranının yükseltilmesi, çekme deformasyonu bakımından önemli olan kaplama esnekliğinde artış sağlamaktadır (The Shell Bitumen Handbook, Chapter 5).

## **2.2 Esnek Kaplamaların Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri**

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile genel anlamda, yol kaplamalarının yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca kaplamanın, yüksek trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlamlar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenen düzeyde kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin arttırılması da amaçlanmaktadır.

Bağlayıcı malzemenin ve dolayısıyla karışımın performansını arttırmak amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir. Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenerek değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ancak bitümün modifiye edilmesi, özelliklerinin tespiti, taşınması ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi için ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi sorunlarla beraber karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme

ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır. Aşağıdaki Tablo 2.1, esnek kaplamaların modifikasyonunda kullanılan karışıma eklenen katkıları (Francken, L., 1998), Tablo 2.2 ise bağlayıcıya eklenen katkıların sınıflarını ve örneklerini göstermektedir (Nicholls, C., 1998).

**Tablo 2.1.** Karışıma eklenen katkı maddeleri.

KATKI MADDESİ TİPİ	ÖRNEKLER
Filler	Kireç, Siyah Karbon, Uçucu Kül
Soyulmayı Önleyiciler	Organik Aminler ve Amidler
Genleştirici Katkılar	Lignin, Sülfür
Oksidasyonu Önleyici Katkılar	Çinko ve Kurşun Oksidasyon Önleyiciler, Fenoliner

**Tablo 2.2.** Bağlayıcıya eklenen katkı maddeleri.

KATKI MADDESİ TİPİ	ÖRNEKLER
Termoplastik Elastomerler	Stiren-Butadiyen-Stiren (SBS), Stiren-Butadiyen-Kauçuk (SBR), Stiren-İsopren-Stiren (SIS), Stiren-Etilen-Butadiyen-Stiren (SEBS), Etilen-Propilen-Dien Terpolimer (EPDM), İsobuten-İsopren Kopolimer (IIR), Doğal Kauçuk, Polibutadiyen (PBD), Polisopren, İşlenmiş kauçuk
Termoplastik Polimerler (Plastomerler)	Etilen Vinil Asetat (EVA), Etilen Metil Akrilat (EMA), Etilen Bütil Akrilat (EBA), Ataktik Polipropilen (APP), Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS)
Termosetling Polimerler	Polyester Reçine, Epoxy Reçine, Poliüretan Reçine, Akrilik Reçine, Fenolik Reçine,
Kimyasal Modifiyerler	Organo-Metalik Bileşikler, Sülfür, Lignin
Lifler	Selüloz, Amino-Magnezyum Silikat, Cam Lif, Asbest
Waxlar (Mumlar)	FT Parafin (Sasobit), Montan Wax, Polietilen Wax, Micro Wax

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin tercih edilmeleri ve uygulamada etkili malzeme olabilmesi için sağlamaları gereken koşullar aşağıda maddeler halinde verilmiştir (The Shell Bitumen Handbook, Chapter 5).

- Kolay elde edilebilmelidir.
- Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir.
- Bitüm ile homojen bir şekilde karışabilmelidir.
- Yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direnci arttırmalıdır.
- Düşük sıcaklıklarda ise asfaltın çok kırılğan veya sert olmamasını sağlamalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.

Karayolları Genel Müdürlüğü (K.G.M.) tarafından belirtilen modifiye bitümlerin şartname limitleri Tablo 2.3’de verilmiştir (K.G.M., 2002).

**Tablo 2.3.** K.G.M. Modifiye bitüm şartname limitleri.

Sıra No	Deney Adı	Standard	Şartname Limitleri			
			Tip - 1	Tip - 2	Tip - 3	Tip - 4
1	Penetrasyon (25 °C), 0,1 mm min.	EN 1426	20	20	40	60
2	Düktilite (25 °C), cm min.	ASTM D113	10	60	80	100
3	Yumuşama Noktası (R/B), °C	EN 1427	65-75	65-75	60-70	50-60
4	Fraas Kırılma Noktası, °C min.	EN 12593	-8	-12	-15	-20
5	Elastik Geri Dönme (25 °C), % min.	PrEN 13398	25	50	50	50
6	Parlama Noktası, °C min.	EN 22592	200	200	200	200
7	Özgül Ağırlık	ASTM D70	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1
8	Depolama Stabilitesi					
8.1	Yumuşama Noktası Farkı, °C maks.	PrEN 13399	4	4	4	4
8.2	Penetrasyon Farkı, °C maks.		5	5	8	8
9	Sertleşmeye Karşı Direnç	EN 12607-2				
9.1	-Kütle Kaybı, % maks.		1	1	1	1
9.2	-Yumuşama Noktasındaki artma, °C maks.	EN 1427	7	7	7	7
	-Yumuşama Noktasındaki azalma, °C maks.		2	2	2	2
9.3	-Penetrasyondaki azalma, % maks.	EN 1426	40	40	40	40
	-Penetrasyondaki artma, % maks.		10	10	10	10
9.4	-Düktilite (25 °C), cm min.	ASTM D113	5	30	50	80
9.5	-Elastik Geri Dönme (25 °C), % min.	PrEN 13398	25	50	50	50

### 2.3 Kullanılan Katkı Tiplerinin Esnek Kaplamalar Üzerindeki Etkileri

Tablo 2.4, bitüm ve bitümlü kaplamaların modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerini ve etki ettikleri yapısal bozulma şekillerini göstermektedir (The Shell Bitumen Handbook, Chapter 5).

**Tablo 2.4.** Farklı tipteki modifiyerlerin faydaları.

Modifiyer	Kalıcı Deformasyon	Termal Çatlama	Yorulma Çatlağı	Nem Hasarı	Yaşlan -ma	Akışkanlık İyileştirme
Elastomerler	+	+	+		+	
Plastomerler	+					
İşlenmiş Kauçuk		+	+			
Siyah Karbon	+				+	
Kireç					+	
Sülfür	+					
Kimyasal Modifiyerler	+					
Antioksidanlar					+	
Adezyon Arttırıcılar				+	+	
Hidrate Kireç				+	+	
Waxlar	+				+	+

Khattak ve Baladi (1998), polimer modifiyeli asfalt karışımların mühendislik özelliklerini incelemiştir. SBS ve SEBS katkılı karışımların elastikiyet, yorulma, çekme ve kalıcı deformasyon özellikleri araştırılmıştır. %5 oranında katılan SBS ve SEBS'in, 25 °C sıcaklıkta stabiliteyi, çekme dayanımını, sertliği arttırdığı; 60 °C sıcaklıkta çekme dayanımını, sertliği artırıp düşey deformasyonu azalttığı; -5 °C sıcaklıkta ise çekme dayanımını artırıp sertliği ve düşey deformasyonu azalttığı belirlenmiştir.

Airey (2002) yapmış olduğu çalışmada; EVA polimer modifiyeli bitümün etkilerini araştırmıştır. Farklı üç kaynaktan elde ettiği modifiyerler ile üç ayrı polimer içeriğinde dokuz ayrı bağlayıcı gurubu oluşturmuştur. Yaptığı deneyler sonucunda EVA polimer modifikasyonunun yüksek servis sıcaklıklarında ve

düşük yükleme hızlarında bağlayıcının sertliğini ve elastikiyetini arttırdığını saptamıştır.

Daly ve ekibi (1993) yapmış oldukları çalışmada; polietilen kullanılan modifiye bağlayıcıların karakterizasyonunu araştırmışlardır. Atıklardan elde edilen farklı tür polietilenler iki çeşit asfalt çimentosuna (AC) eklenerek sünme ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanım incelenmiştir. Asfalt – polietilen karışımların katkısız asfalt karışımlara göre daha rijit oldukları tespit edilmiştir.

Stuart (1993), kimyasal modifiyerler kullanarak yapmış olduğu çalışmada, bitüme %1,5 oranında krom trioksit ( $CrO_3$ ), %6 oranında maleik anhidrit (MAH) ve %0,75 oranında furfural katılarak elde edilen karışımları incelemiştir. Karışımların geri dönüşümü yapılarak elde edilen bağlayıcıların penetrasyon ve viskozite bilgileri belirlenmiş, bu bilgilerden yola çıkarak modifiyeli bitümlerin saf bitüme göre yüksek sıcaklıklarda daha sert, düşük sıcaklıklarda ise daha yumuşak olduğu saptanmıştır.

Airey (2003) yapmış olduğu çalışmada; SBS polimer modifiyeli yol bitümlerinin reolojik özelliklerini araştırmıştır. İki farklı bitüme üç değişik oranda SBS eklenmesi ile elde edilen bağlayıcılar üzerinde yapılan deneylerde, SBS oranının arttıkça viskozitenin, penetrasyonun, yumuşama noktasının ve duktilitenin arttığı tespit edilmiştir.

Fortier ve Vinson (1998) yapmış oldukları çalışmada; modifiye edilmiş asfalt beton numunelerin yaşlanma performansını ve düşük ısı çatlaklarını incelemiştir. Bu çalışmada, bitüme lateks polimer, etilen akrilat kopolimer, kauçuk tozu, elastomer ve polipropilen – fiber karışımı eklenerek beş ayrı modifiye bağlayıcı elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda kırılganlık deneyine tabi tutulan numunelerden sadece lateks polimer ve kauçuk tozu defleksiyonu ve yumuşaklığı arttırmıştır. Yaşlandırılmış numunelerden ise sadece elastomer katkılı karışım düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımı arttırmıştır.

Rao ve Mazumdar (1993), uçucu külün etkilerini ve kum - asfalt - sülfür kaplama karışımların özelliklerini incelemiştir. Kaliteli kaba agrega bulunmayan yerlerde uygulanabilen kum - asfalt - sülfür karışımların kusurlarından birinin yüksek hava boşluğu olduğunu belirlemiştir. Bu istenmeyen durumu ortadan kaldırmak için karışıma fillerin yerine uçucu kül ilave

etmişlerdir. Sonuç olarak, kum - asfalt – uçucu kül – sülfür karışımların yoğun gradasyona sahip beton asfalta göre daha yüksek stabilite değerlerine ve daha düşük boşluk oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kennedy ve ekibi (1998), atık toner ile modifiye edilen bağlayıcı ve karışımların performans karakteristiklerini araştırmışlardır. Asfalt Çimentosuna farklı oranlarda katılan atık tonerin bağlayıcı ve karışım özellikleri incelenmiş, karışımdaki atık toner miktarı arttıkça sertliğin ve viskozitenin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca karışım analizleri yapıldığında toner modifiyeli karışımların, beton asfalt karışımlara göre daha yüksek stabilite gösterdiği saptanmıştır.

Zoorob ve Suparma (2000), agregaya yerine geri dönüşümü yapılmış plastik kullanılan karışımların özelliklerini araştırmıştır. Agregaya yerine aynı boyutta plastik kullanılması, taşıma maliyeti bakımından önemli olan karışım yoğunluğunu azaltmış, stabiliteyi ise %250 oranına kadar arttırmayı başarmıştır.

Ylva ve arkadaşları (2006), ticari mumları ve polifosforik asidi kullanarak bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmanın sonucunda bazı mumların bitümün akışkanlık özelliğini iyileştirdiği ve plentte BSK'nın hazırlanma esnasındaki enerji tüketimi ile çevre kirlenme gibi sorunları azalttığı ortaya konmuştur.

## **2.4 Ticari Mumlar**

Sanayinin gelişmesiyle birlikte ticari mumların kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucu olarak ticari mumlar günümüzde önemli bir sanayi malzemesi haline gelmiştir. Mobilyadan, kişisel bakım ürünlerine kadar birçok sanayi dalında sayısız materyalin hammaddesi, yan ve onarım elemanı olarak kullanılmaktadır.

### **2.4.1 Türleri ve üretim şekilleri**

Geleneksel adı itibariyle “wax” olarak bilinen mum, insan hayatında çok yönlü olarak kullanılan en eski doğal maddelerden biridir. Kayıtlara göre;

mumların kullanımı M.Ö.3000 yıl öncesinde Antik Mısır'da ölümlerin mumyalanması işlemi sırasında koruyucu tabaka olarak kullanıldığı yazılmaktadır.

Mum çok karmaşık yapısı ile birçok farklı tipi olan bir bileşimdir. Basit bir tanımlama ile sağlam ve sert yapısının yüksek sıcaklığa tabi tutulması sonucunda düşük akışkanlıktaki sıvıya dönüşmektedir.

Günümüzde en çok bazı çözünen maddeler ile harmanlanmış olan çeşitli tipteki sert macun ya da sıvı tipleri talep görmektedir. Öz yağları, sadeyağlar, boya maddeleri, kumaş boyaları ve diğer karışım maddeleri de bir diğer mum formüllerini oluşturmaktadır. Birçok imalatçı da kendi ürün karışım formüllerini büyük bir özenle oluşturmakta ve gizlemektedir.

Ultraviyole ışınlarının zarar verici etkilerine, hava kirliliği etkilerine, nem, asit ve kir etkilerine karşı koruma sağlamaktadır. Kullanım yüzeyi üzerindeki birleştirici etkisi ile kopmaları en aza indirebilir ancak bazı çeşitleri bu etkiler üzerinde tam dayanıklılık göstermeyebilir. Petrol esaslı olan, mikrokristal mum ve makrokristal mum (parafin) olarak anılan türleri yüksek nem geçirmezlik özelliğine sahiptirler. Mikrokristal mumlarda asit ve alkol geçirmezlik oranı yüksek seviyelerdedir. Bazı türler ise ultraviyole ışınlarının zarar verici etkilerine karşı mükemmel koruma sağlamaktadır. Yapısındaki ultraviyole tutucuları, ışınların geçişini engelleyerek özellikle renk kaybını önlemektedir.

Mum üretiminde standart sertlik ölçüsünü belirlemek için penetrasyon test cihazı kullanılmaktadır. Birçok çeşide sahip olan mum türleri arasında, içerdikleri ana maddeler ve oluşum yapısına bağlı olarak farklı penetrasyon değerleri vermektedirler. Bununla beraber ilgili ürünlerin erime sıcaklık noktalarında değişkenlik göstermektedir.

Mum çeşitlerine yönelik basit bir sınıflandırma yapmak gerekirse;

- **Hayvansal mum:** Arı mumu ve Shellac mum;
- **Bitkisel mum:** Carnauba, Candelilla, Ouricury ve Japon bitkisel mumları;
- **Mineral mum:** Montan, Ozokerite, Ceresine reçine mumları;
- **Petrol esaslı mum:** Makrokristal mum, Mikrokristal mum (Parafin);
- **Sentetik mum:** Polietilen, Fischer-Trops mumları olmak üzere beş gruptan söz edebiliriz.

Hayvansal mumların türleri özellikle genç işçi bal arıları tarafından bal hazinesi ve yuva yapımında sağladıkları ürünün filtrezyasyon gibi farklı işlemlerden sonra sarıdan kahverengiye uzanan renk dilimine sahip bir türdür. Orta sertlikte ki bu mum 25 °C'de 20 dmm. penetrasyon değerine sahiptir.

Bitkisel mumların türleri arasında sayılan Carnauba mumu, Copernicia Cerifira türündeki dış tabakası mumlu Brezilya Carnauba Palmiyesi türü ağaçtan elde edilir. Mum içeren üst katmanlar bir yılda Eylül ve Aralık ayları olmak üzere iki defa toplanır. Toplanan mumlu bölümlerdeki mum mekanik çırpıcılar ile ayrılır. Yıllık iki kesim mevsiminde her dönem için maksimum 20 ağaç toplanır ve bu ağaçların kullanılabilir kısımdan sadece 1 kg. Carnauba Mum elde edilir. Yeni toplanmış ve henüz açılmamış olan mumun türü solgun sarı renktedir, daha önce ayrılmış ve bekletilmiş (güneş ya da suda) olanlarda, yeşilimtrak kahverengiye çalan bir renk görülmektedir. Solgun sarı renkte olanlar yüksek derecede Carnauba içerir. Carnauba Mum çok sert doğal bitkisel bir mum türüdür. Penetrasyon testi uygulaması yapıldığında 25 °C'de 2 dmm., 43,3 °C'de 3 dmm. penetrasyon vermektedir. 84 °C'de olan ergime sıcaklığında kırılğan ve yapışkan olmayan bir yapı gösterir. Carnauba mumu, çok yüksek parlaklığı, ergime derecesi, dayanıklılığı ve yağlılık oranı ile diğer mumlar arasında ayrı bir yere sahiptir. Bu özelliklerine istinaden cila, koruma maddesi, parlaticı ve yağlayıcı olarak kullanılmaktadır.

Candelilla mum, Euphorbia Antisyphilitica ve Pedilanthus Pavonis türündeki bitkilerin dış yüzeylerinde içerdiği Candelilla şurubundan elde edilir. Bu şurubun elde edildiği bitki türleri öncelikli olarak Amerika Birleşik Devletleri ve Meksika sınırındaki Coauhila ve Chihuahuan çöllerinde yetişmektedir. Mum, bitkinin suda ısıtılıp sülfürik asit eklenerek yüzeyi sıyrılıp filtre edildikten sonra ayrılır. Mumun rengi sarı ve kahverengiye çalan sarı renkte olup az yapışkan bir yapısı vardır. Carnauba Mumdan daha yumuşak bir yapıya sahip olan Candelilla Mum, 25 °C'de 3 dmm. penetrasyon vermekte ve ergime sıcaklığı 70 °C'dir. Bazen yüksek parlaklık derecesi ve yaklaşık penetrasyon değerleri sebebiyle Carnauba Mum yerine de kullanımı mümkündür.

Ouricury Mum; Syagros Coronata'dan yani Brezilya Tüylü palmyesinden elde edilir. Carnauba Mumun parlaklık ve sertlik ölçeklerine çok benzer özellik içermesine rağmen rengi çok daha koyudur. Ne var ki, değerliliği Carnauba

mumdan daha zor elde edilebilirliğinden gelmektedir. Ergime derecesi 82,5 °C olan Ouricury mum bazı zamanlarda ve özellikle koyu renkli mum istendiğinde Carnauba Mum yerine kullanılmaktadır.

Ham montan mumu, mineral grubuna dahil olan ancak, linyit kömürü ve bataklık kömürü tortularının çözülümü ile meydana gelen bitki orijinli doğal bir mum türüdür. Arıtılmış rafine montan mum, reçine ve asfalt esasının bazı ilave işlemlerden geçirilmesi ile elde edilir. Sert yapısı ile 79–90 °C arasında ergir. Koyu kahverenginden açık sarı renge doğru bir görünüme sahip olabilir. Yüksek parlaklık veren bu mum özellikle yüzey çizikleri gibi etkilere ve suya karşı yüksek geçirmezlik göstermektedir.

Makrokristal mum (parafin) gevşek yapılı, yağdan arındırılmış petrol esaslı bir mum türüdür. Yağ buharlaştırma işlemi ile damıtılarak elde edilen ürün, kırılkan yapısı ile 46–71 °C düşük ergime derecesine sahiptir. Neme karşı yüksek geçirmezliği söz konusudur ve diğer mum türleriyle birleşime müsait bir yapıya sahiptir.

Mikrokristal mum (parafin) ham yağ tanklarının dip kısmında kalan petrol yağ buharından kalan doymuş hidrokarbon bölümünden oluşur. Mikrokristal mumun kristal yapısı diğer mumlara göre çok daha küçüktür ve nem, alkol, asit gibi maddelere karşı yüksek geçirmezlik özelliği gösterir. Mikrokristal mum sert bir yapıya sahiptir. 25 °C'de 11 dmm.'den daha düşük penetrasyon verebilmekte ve 60-93 °C ergime sıcaklığına sahiptir.

Polietilen mum, etilenin en yüksek ya da düşük basınçlı katalitik polimerizasyonu ile ayrılmış sentetik mum türüdür. Ürünün çeşitli ergime derecesi ve yoğunluğu söz konusudur. Etilen, doğal gaz ya da çözülmüş petrol naftalinden elde edilir. Yüksek yoğunluklu polietilenin ergime sıcaklığı 85-141 °C arasındadır. Düşük yoğunluklu polietilenin ergime sıcaklığı ise 30-141 °C arasında değişmektedir. Polietilenin penetrasyon test sonuçlarında özelliğine bağlı olarak farklı değerler ortaya çıkmakta ve bu değer 7-12 dmm. arasında değişmektedir. Mum yüzeyi üzerinde sağlamaştırıcı ve aşınma önleyici pozitif etkileri vardır (Wilhelm, R. vd., 2005; Dadant ve oğulları, 1975).

## 2.5 Mum İçeren Bitümler

Mumlar bitüm içerisinde, bitümlerin çıkarıldığı bölgeye göre değişkenlik göstermekle, değişken miktarda bulunmakta ve bitüm özelliklerini farklı yönlerde etkilemektedir. Bitümlerin içerdiği mum oranının bitümü nasıl etkilediğine dair çeşitli görüşler mevcuttur. 1933'te Londra'da gerçekleştirilen dünyanın ilk petrol kongresinde, bitüm içeriğinde bulunan mumların kristalleşme özelliklerine göre incelenmesi ve bitümlerin performansını etkileyen diğer standartların acil olarak belirlenmesinin gerekliliği ortaya konmuştur.

Bitümlerin içerisinde doğal olarak bulunan mum, bağlayıcının fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Doğal mum, esnek üstyapılarda çatlak oluşumunun daha çok gözlemlenmesine ve plastik deformasyonun artmasına neden olabilmektedir. Buna karşın, fiziksel yapısının değişken olması nedeniyle bazen de mum bitümü sertleştirebilmektedir. Dolayısıyla, bu tür mumlar kaplamanın yüksek sıcaklıktaki dayanıklılığını arttırabilmekte ve bunun sayesinde yolda tekerlek izi oluşumunu azaltabilmektedirler.

Bitümde mumun büyük kristal halinde bulunması (makrokristal mum) sorun yaratıcı bir durum olarak dikkate alınmıştır. Ancak, günümüzde mikrokristal ve/veya amorf mumların mevcut olduğu bitümler kullanılmaktadır. Çünkü mikrokristal ve amorf mumlar kristalleşmeyi engelleyebilen, heteroatomlardan oluşan alisiklik ve aromatik bileşenlerden ibarettir (Redelius, 2004).

### 2.5.1 Mum ve bitüm içindeki mum

İngilizce bir kelime olan "wax - mum" (Anglo Sakson kökenli weax kelimesinden türetilmiş) ilk olarak "beeswax - bal mumu" anlamında kullanılan bir terimdir. Zamanla, bu kelime daha büyük bir önem kazanmış olup doğada bulunan muma benzer katılar ile sıvılar ve bu maddeleri oluşturan bileşenler (hidrokarbon, asit, alkol, mum özelliğine sahip ester) için kullanılmaya başlanmıştır. Kimyasal yapısında mum özelliği taşımayan ancak fiziksel yapısı muma benzeyen ve mum yerine geçen sentetik maddeler de mum kavramı içine

yerleştirilmiştir (Warth, 1956). Sentetik mum ile doğal mum arasında belirgin farklar bulunmamaktadır. Normalde mumlar suda çözülmeyen, alkolde ise çözülmesi zor olan ve erimiş halde yağ ile karıştırılabilen bir maddedir.

Genellikle ham mum; cila, pastel boya üretimi ve madde emdirme vb. birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Ham mumların çoğu, hidrokarbonun en büyük kaynağı olan petrolden üretilmektedir (Musser, 1998). Petrol mumu, petrol sanayisinde bir yan üründür. Örneğin, makine yağı uygun bir düşük sıcaklıkta üretilirken mum petrolden ayrıştırılarak elde edilmektedir.

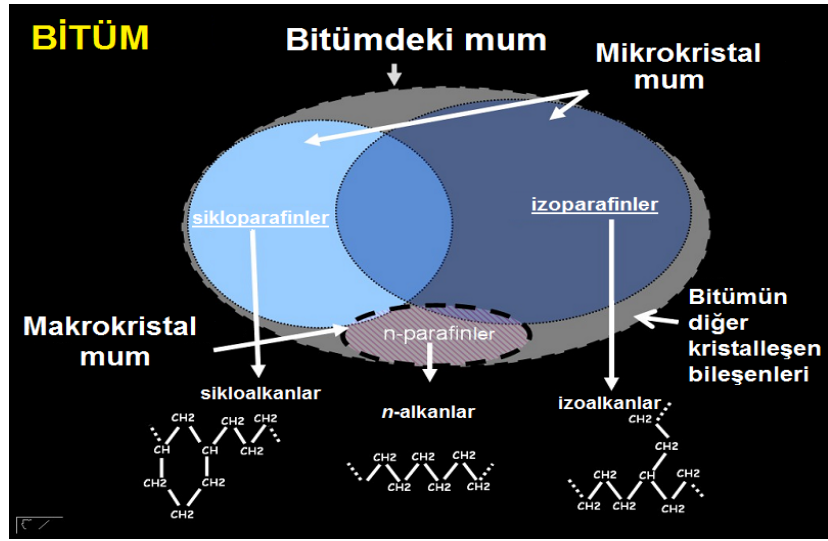
Parafin yönünden zengin olan ham petrolün bitüm üretimi için uygun olmadığı düşünülmektedir. Aynı zamanda asfalten yönünden zengin olan ham petrol gerekli ihtiyacı karşılayabilecek oranda değildir. Bundan dolayı bitüm üretiminde temel madde olarak parafin naftenli ham petrol kullanılmaktadır.

Mum içeriği bitüm üretiminde herhangi bir kriter oluşturmaz çünkü mum, damıtma derecesi ve ham petrolün türüne göre değişkenlik göstermektedir. Bitüm üretiminde ana madde seçimini belirleyen ham petrolün mum içeriği değil yoğun damıtma sonucu oluşan çökeltidir. Ayrıca, bitümdeki mum içerik oranının da %3 üzerinde olmaması tavsiye edilmektedir. Bitüm içindeki mumun ayrıştırılması birçok değişken tarafından etkilenen bir işlemdir. Bu işlem halen tam olarak kavranamamakta ve kontrol edilememektedir. Bunların yanı sıra farklı mum hakkındaki fikirlerin belirgin tanımları da bulunamamaktadır.

Bitüm içeriğinde mevcut olan mum uzun zamandır ilgi çeken bir konu olmuştur. Özellikle mumun bitüm kalitesi üzerindeki etkisi ve mum içeriğini araştırmada kullanılan yöntemler, ilgi duyulan konuların başında gelmiştir (Boucher, 1991). Mumun bitüm kalitesi üzerindeki etkilerine ilişkin yıllardır farklı görüşler ortaya atılmış ve bazen bu fikirler birbiriyle çelişmiştir (Barth, 1962; Krom, 1968; De Bats, 1975; Fritsche, 1995; Gawel, 1998; Butz, 2001; Edwards, 2003). Mumun bitüm üzerindeki olumsuz etkilerinin kristalleşme ve erime özellikleriyle ilişkili olduğu saptanmış ve çeşitli mumların bitüm performansını farklı yönlerde etkilediği belirtilmiştir (Edwards, 2008).

## 2.5.2 Bitümdeki mum içeriğinin belirlenmesi ve sınıflandırılması

Bitümdeki mumun tanımı; zararlı, az zararlı ya da zararsız olan mum arasındaki farkı belirginleştirmek için gerçekleştirilmiştir. Genellikle bitüm içindeki mumlar makrokristalin, mikrokristalin ve/veya amorf (kristalleşmeyen) mum olarak genel üç sınıfa ayrılmaktadır. Makrokristalin mumlar 30 karbon atomuna sahiptirler ve daha büyük kristal taneleriyle kristalleşmektedirler. 40 ya da üzeri karbon atomu bulunması durumunda ise daha küçük kristaller yani mikrokristalin oluşmaktadır. Dallanmış karbon zincirler; aromatik ve alisiklik bileşenler ya da hetero atomlar içeren mumlar kristalleşmede zorluk göstermekte ve bu tip mumlar amorf, esnek ve elastik olarak kabul edilmektedir (Boucher, 1991). Bitümdeki mumun basit bir şematik resmi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Bitümdeki mumun şematik resmi.

Bu şekil bitüm içindeki makrokristalin ile mikrokristalin mumun kimyasal bileşenleri oluşturan genel yapısal formüllerini içermektedir. Bitüm içerisindeki bazı bileşenler mum çökeltisini etkileyebilmekte ve bu durum farklı tür bitümlerin farklı mum toleransına sahip olduğunu göstermektedir (özel yöntemlere göre mumsuz bitüme ticari mumlar eklendikten sonraki penetrasyon ve viskoz ölçümlerdir (Boucher, 1991)).

### 2.5.3 Bitümün mum içeriği

Mum içeriğine ilişkin farklı yöntemler, hem mum miktarı hem de mum kalitesi ile ilgili çeşitli sonuçlar vermektedirler (Fritsche, 1995; Gawel, 1997, 1998; Krom, 1968; Noel, 1970; Barth, 1962; Edwards, 2003; Mózes, 1982; Boucher, 1991). Teknolojinin ilerlemesiyle, mum içeriğini belirlemede farklı yöntemler ve prosedürler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Holde tarafından geliştirilen Alman yöntemi (DIN-52015) (kuru damıtma yöntemi);
- Fransız yöntemi (NF-T66);
- Shell yöntemi SMS 1769 (SHRP-A-369);
- IR yöntemi (Van Doorn, 2002; McKay, 1995) (IR bölgeleri olarak 750–680  $\text{cm}^{-1}$ , 940–660  $\text{cm}^{-1}$  ve 1800–1530  $\text{cm}^{-1}$  kullanılmıştır);
- Iatrosan yöntemi (Unterleutner, 1998) (DIN 52015'e göre Iatrosan analizi ile parafin mum içeriği arasında bir ilişki tespit edilmiştir);
- Diferansiyel Taramalı Kalorimetresi (DSC) (Noel, 1970; Brulé, 1990; Edwards, 2003; Lu, 2004);
- Üre ile eklenti oluşturma (Boucher, 1991; Mózes, 1982; Barth, 1962);
- Genleşme ölçümleri (Krom, 1968; Bahai, 1992);
- Parlaklık yöntemi (Obertür, 1998) (bitümün parlaklığı reflektometre ile ölçülür).

SHRP çalışmalarında mum içeriğine ilişkin bir şartname bulunmamaktadır. Ancak, Boucher mum içeriğinin yanı sıra mum toleransının da dahil edilmesi gerektiğini düşünmekte hatta mum toleransına ek olarak düşük mum içeriğini de bir koşul olarak görmektedir.

Edwards'a göre DMA ölçümlerindeki mum kriterini belirlemek, herhangi bir test ile maksimum mum içeriğini belirlemeye oranla daha önemli olmalıdır. Ayrıca, bitümdeki mumu ayrıştırmak için kullanılan yöntemler daha ayrıntılı bir

şekilde tanımlanmalı ve kimyasal açıdan elde edilen mum bileşenleri farklı mum türlerini birbirinden ayırt edebilmek amacıyla belirtilmelidir.

#### 2.5.4 Mumun bitüm üzerindeki etkileri

Doğal mumun bitüm üzerindeki etkisine ilişkin birbiriyle çelişen birçok görüş mevcuttur. Bitüme yönelik laboratuvar ortamındaki birçok çalışmalarda, mumun bitüm özellikleri üzerindeki geleneksel etkileri incelenmiştir. Genellikle mumun kristalleşmesi, viskozite değerleri kullanılarak hesaplanır ve neticede belirlenen yumuşama noktası deneysel olarak tespit edilen yumuşama noktasına nazaran daha düşük olarak kabul edilir. Bitüm içindeki mumun tespit edilmesindeki diğer basit bir yöntem ise, bağlayıcı 60 °C'ye kadar ısıtıldıktan ve serbest soğumaya bırakıldıktan sonra bu sıcaklıklardaki viskozite farklarına bakılarak bitümün işlenmesidir. Ancak, bu yalnız *n*-alkan yönünden zengin bitüm mumları üzerinde uygulanabilmektedir.

Farklı bitüm türlerinin reometre analizleri birçok araştırmanın bazı kısımlarını oluşturmaktadır. Bu çalışmalarda incelenen bitüm üç gruba ayrılmıştır:

- Farklı tür doğal mumları içeren bitüm;
- Farklı yöntemlerle bitümden mum ayrıştırılarak doğal mum eklenen bitüm;
- Ticari makrokristalin veya mikrokristalin mum eklenen bitüm.

Bu tür çalışmalarda elde edilen sonuçların bazıları aşağıda verilmiştir:

- Mumun içeriği ile mum cinsi, ham petrole ve üretim süresine bağlı olarak değişmektedir. Kural olarak, ham petrolden naftenik türün damıtılması parafin türü hidrokarbonun düşük içerikte olduğunu göstermektedir. Bitümdeki muma genellikle mikrokristalin ve/veya amorf yapıda rastlanmaktadır.
- Mumun etkilerini belirleyen parametreler, bitümün kimyasal bileşimi ve reolojik özellikleri; bitüm içindeki mum miktarına ve mumun kristal

yapısına bağı olarak değişmektedir. Mumun bitüm üzerindeki etkisi kristalleşme ve erime özellikleri açısından bilinmektedir. Bitümdeki *n*-alkan yönünden zengin kristal mum, yüksek sıcaklıklarda ani yumuşa etkisi ve düşük sıcaklıklarda ise katılaşıma etkisi yaratmaktadır. Düşük *n*-alkan içeren ya da hiç içermeyen kristalleşen mum, bitümü çok düşük derecede etkilemekte ve mumun erime noktasının altında belli bir katılaşıma etkisi meydana getirmektedir.

- Mumun etkisini belirleyen nesnelere; uygulama ısı ve bitüm içindeki mumun çeşididir.
- Bitümdeki mumun etkilerine yönelik görüşlerin çeşitlilik göstermesi, çeşitli yöntemlerin farklı sonuçlar vermesi ile ilişkilidir. Bu durum hem mum miktarı hem de mum kalitesi için geçerlidir. Bu yöntemlerden birçoğu yıllardır kullanılmaktadır. Bunlardan birisi de DSC yöntemidir. Bu metotla son zamanlarda mum içeriğinin belirlenmesi literatürlerde sıkça rapor edilmektedir.

Heteroatomların miktarı, mumdaki alisiklik ve aromatik bileşenlerin yanı sıra moleküler dağılımı ile dallanmış karbon zinciri mum özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Mumun bitüm üzerindeki etkisi düşünüldüğünde, bitüm için kullanılan sıcaklık aralığı oldukça önemlidir. Çünkü farklı tür mumlara ait kristalleşen kısımlar, bitümlerde farklı geçiş faz alanlarını (kristalleşme ve erime) göstermekte ve bu durum bitümün reolojik özelliklerini etkilemektedir. Diğer bir değişle bitümdeki mumlar, sıvının bir parçası olmayı sürdürürken rijitliği azaltmaktadır. Ancak, bitüm içerisindeki mum, koloidal yapıyı (kutup gruplarının yönü), yani bağlayıcının stabilitesini ve homojenliğini bozabilmektedir. Ayrıca, mumlu bitüm zamanla sertleşmekte (fiziksel sertleşme) ve özellikle de düşük sıcaklıklarda bu sertleşme neticesinde asfalt kaplamalarında termal çatlaklar oluşmaktadır. Bitümdeki mumun olumsuz etkilerinden biri olan, kristalleşen mumun erimesi sonucunda viskozitedeki ani düşüş, belki de mumun bitüm üzerindeki en olumsuz özelliğidir. Diğer olası dezavantajlar arasında, kırılma, fiziksel sertleşme, düşük süneklik ve düşük yapışkanlık gibi özellikler yer almıştır. Ancak, bitümdeki mumun olumsuz etkilerine ilişkin deneylere ait sonuçlar sadece bitüm ve bitüm karışımları üzerine yapılan laboratuvar

çalışmalarına dayandırılmış ve şu ana kadar mumlu bitümlerin asfalt özellikleri üzerindeki etkisine yönelik çalışma neredeyse hiç rapor edilmemiştir. Bunların yanı sıra, mum içeriğinden kaynaklanan bağlayıcı üzerindeki geniş etkiler asfalt beton özellikleri üzerindeki etkilerin oluşacağı anlamına gelmemektedir (Soenen, 2004).

### **2.5.5 Ticari mumların katkı maddesi olarak kullanılması**

Bitüm akışkanlığını iyileştirici olarak mum ürünlerinin bitüme eklenmesi özellikle Alman asfalt sanayisinin dikkatini çekmektedir (Damm, 2002; Butz, 2001). Mum ile modifiye edilmiş bitüm, yüksek sıcaklıklarda akışkanlığı iyileştirmekte, bağlayıcı ve asfalt karışımları üzerinde yumuşatma etkisini göstermektedir. Bu modifikasyon işleminin temel sebebi, enerji tüketimini azaltarak BSK sıcaklığını düşürmektir. Bu temel hedefe ek olarak işlenebilirliği ve kullanımı artırmak da amaçlanmaktadır. Geliştirilmiş sıkıştırma yöntemiyle elde edilen düşük boşluk içeriği, BSK kaplamasının daha yoğun ve dayanıklı olmasını sağlamakta, yüksek sıcaklıklarda deformasyona karşı direnç gibi pozitif etkilerini meydana getirmektedir. Ancak, katkı olarak kullanılan mumun, bitümün yorulma ile yapışma özellikleri üzerindeki etkisi ve düşük sıcaklık performansı üzerine yapılan çalışmalar fazla değildir. Bitümün viskozitesini azaltmak amacıyla, FT-parafin, montan mumu ürünleri, oksitlenmiş polietilen mumu, termoplastik resin ve yağlı asit amitleri kullanılmaktadır. Bu ürünlerin moleküler ağırlık dağılımları farklılık göstermektedir (Edwards, 2008).

1922'de Alman kimyager Frans Fischer ve meslektaşı Hans Tropsch, kömürü basınç altında ısıtıp karbon monoksit ve hidrojen gazı karışımını elde ederek sıvı yakıt üretmenin yöntemini geliştirmişlerdir. Karışım metal kalıplara boşaltılmış ve daha bol hidrojen gazında pompalanmıştır. Böylelikle kimyasal reaksiyonlar sonucunda uzun hidrokarbon zincirleri oluşturulmuştur.

Dünya çapında, çeşitli mumlar arasında modifiyer olarak en çok kullanılanı FT-parafin olup, 40 ile 100 arasında karbon atomu içeren hidrokarbon zincirlerinden oluşmakta ve 70 ile 120 °C dereceler arasında erimektedir (Edwards, 2008).

### **3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA (BSK) KULLANILAN MALZEMELER**

#### **3.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar**

BSK'larda agrega, karışımın ağırlıkça %90 – 95'ini oluşturmaktadır. Agregaların ve agrega – bağlayıcı karışımların özellikleri, kaplamanın ömrüne, dayanımına ve performansına doğrudan etki etmektedir. Agregaların, beklenen görevleri yerine getirebilmesi için belirli mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması gerekmektedir (Tunç, A., 2004).

##### **3.1.1 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.

##### **3.1.1.1 Mineralojik sınıflandırma**

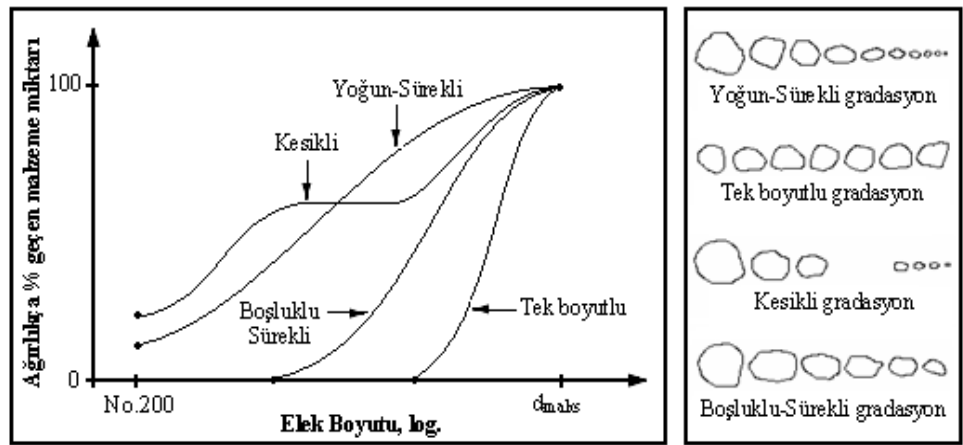
Agregalar genel olarak; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlardan elde edilmektedir. Dere malzemeleri, sahip oldukları olumsuz özelliklerden dolayı alttemel hariç yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yapay taşlar ise genellikle yüksek fırın cürüflerinden elde edilmektedir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agrega, kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalardır (Tunç, A., 2004).

### 3.1.1.2 Boyut sınıflandırması

Agregalar boyut bakımından; kaba, ince ve filler olarak sınıflandırılmaktadır. No: 4 (4,76 mm) eleğin üzerinde kalan kaba agrega, No: 4 elekten geçip No: 200 (0,075 mm) eleğin üzerinde kalan ince agrega ve No: 200 elekten geçen malzeme ise filler olarak isimlendirilir. Maksimum dane boyutu, malzemenin tamamının geçtiği minimum elek açıklığı olarak tanımlanmaktadır. Kaba agrega karışımın ana iskeletini oluştururken ince agrega ve filler bu iskeletin arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmesini sağlamaktadır (Tunç, A., 2004).

### 3.1.1.3 Gradasyon sınıflandırması

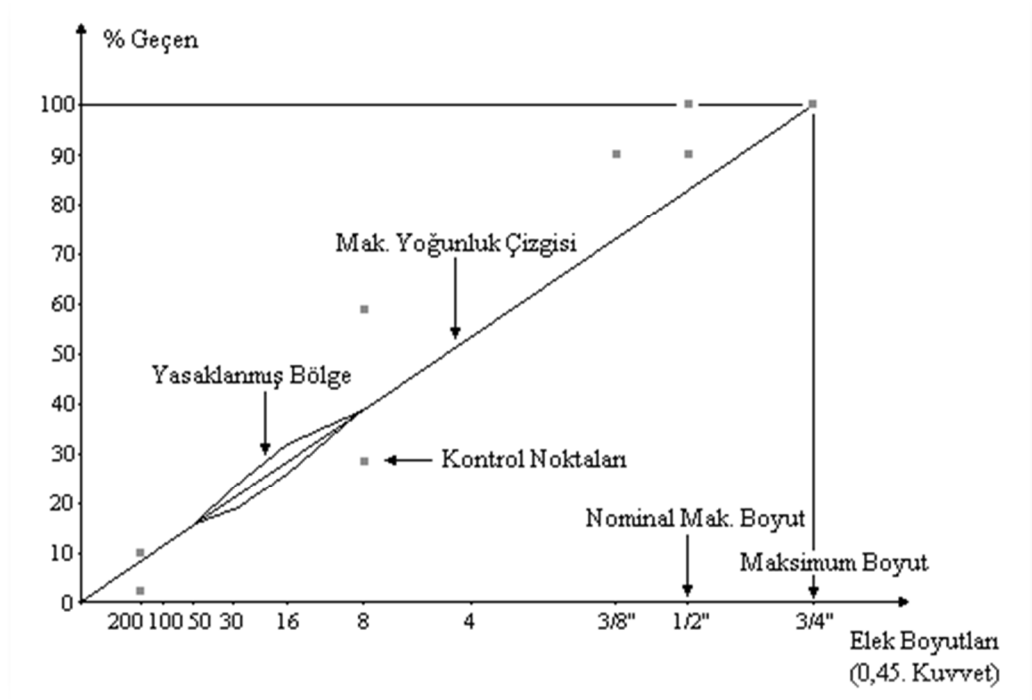
Gradasyon, agrega harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Gradasyondaki maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşmakta, segregasyon artmakta, yoğunluk ve stabilite artarken bağlayıcı ihtiyacı azalmaktadır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi agrega gradasyon yönünden kesikli, yoğun – sürekli, boşluklu – sürekli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört sınıfa ayrılmaktadır (Tunç, A., 2004).



Şekil 3.1. Agregaların gradasyon sınıflandırılması.

Kesikli gradasyon, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden boşluk miktarı fazladır. Yol kaplamalarında genel olarak kullanılmamaktadır. 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 karışımın 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 arttırmanın yanında geçirimsizliği azaltmasını sağlamaktadır. Yoğun – sürekli gradasyon, bitümlü sıcak karışımlarda tercih edilen gradasyon sınıfıdır.

BSK tasarımında yeni bir yaklaşım olan Superpave, farklı bir gradasyon yapısı sunmaktadır. Bu yeni sistemde maksimum yoğunluktaki karışımı tespit etmek amacıyla gradasyon grafiğinin yatay ekseninde bulunan elek açıklıklarının 0,45. kuvveti dikkate alınmaktadır. Superpave gradasyon sisteminde maksimum boyut, nominal maksimum boyut, maksimum yoğunluk çizgisi, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları terimleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.1, maksimum dane boyutu 3/4" için Superpave gradasyon limitlerini göstermektedir.



Çizelge 3.1. Maksimum boyutu 3/4" olan superpave gradasyon limitleri.

Nominal maksimum boyut, üzerinde toplam %10'dan daha fazla malzemenin kaldığı ilk elek boyutundan bir boyut büyük olan elek çapıdır. Maksimum boyut ise nominal maksimum boyuttan bir boyut büyük olan elek çapıdır. Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu hattı belirlemektedir. Bu noktalar, nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm.) ve en küçük boyutlu elekte belirlenmiştir.

Maksimum yoğunluk çizgisi, orijinden maksimum agrega boyutunun %100 geçen noktasına çizilen doğru ile elde edilmektedir. Bu çizgiye yakın gradasyonlarda, agregalar arasında bitümün girebileceği yeterli boşluk oluşmamakta, yetersiz bağlayıcı sebebiyle de kaplamanın durabilitesinde azalma meydana gelmektedir.

Yasaklanmış bölge, gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bant şeklinde bir bölgeyi temsil etmektedir. Yasaklanmış bölge, 2,36 mm. ve 0,3 mm. açıklıklı elekler arasında maksimum yoğunluk çizgisine yakın bir bölgeyi ifade etmektedir. Gradasyonun maksimum yoğunluk çizgisinden uzaklaşmasını sağlayan yasaklanmış bölge, bu sayede agregalar arasında bitümün girebileceği yeterli boşluğun oluşmasını sağlamaktadır.

Yasaklanmış bölgenin içinden geçen gradasyonlar yetersiz agrega arası boşluğa sahip olurken, yasaklanmış bölgenin altı ile kontrol noktaları arasından geçen gradasyonlar ise aşırı ince malzeme ihtiva ettiğinden dolayı yapım sırasında birtakım güçlükler neden olmakta ve kalıcı deformasyon direncinde azalmaya sebep olmaktadır. Trafik seviyesi arttıkça gradasyonun, yasaklanmış bölgenin altında minimum kontrol noktasına yaklaşması tavsiye edilmektedir. Ek 1, nominal boyuta göre karışım gradasyon limitlerini göstermektedir (Tunç, A., 2004).

#### **3.1.1.4 Biçim sınıflandırması**

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 (Tunç, A., 2004).

### **3.1.1.5 Yüzey yapısı sınıflandırması**

Agregaların yüzey yapısı, danelerin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade etmektedir. Agregada 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 (Tunç, A., 2004).

### **3.1.1.6 Porozite sınıflandırılması**

Agregada danelerinin, bitümün emilmesine olanak sağlayacak oranda poroziteye sahip olması gerekmektedir. Yeterli poroziteye sahip agregalar, bağlayıcı ile güçlü bir adezyon sağlayarak stabilitenin artmasına ve bitüm film tabakasında soyulmanın azalmasına olanak sağlamaktadır. Porozitenin fazla olması ise yoğunluğun ve stabilitenin düşük olmasına ayrıca bitüm ihtiyacının artması sebebiyle sıcak havalarda terleme meydana gelmesine neden olmaktadır (Tunç, A., 2004).

### **3.1.1.7 Yüzey alanı ve boşluk sınıflandırması**

Agregada danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ve agregada 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 (Tunç, A., 2004).

### 3.1.2 Agregalara uygulanan deneyler

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların uygunluğunu belirlemek amacıyla dane boyutu (elek analizi) ve özgül ağırlık deneyleri yapılmaktadır.

#### **3.1.2.1 Dane boyutu (elek analizi) deneyi (TS 1900)**

Elek analizi, numuneleri elekler üzerinde en az 2 dakika sarsmak ve her elek üzerinde kalan agregayı tartmak suretiyle yapılmaktadır. Elek analizinde eleğin fazla yüklenmesi, önemli hatalara neden olabilmektedir. Elekten geçen miktar tartılıp numunenin bütün ağırlığına bölünerek karışımdaki yüzdesi tespit edilmektedir. Her bir elek üzerinde kalan malzeme yüzdelerine göre agrega karışımının granülometri eğrisi çizilmektedir (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

#### **3.1.2.2 Özgül ağırlık ve su emme deneyi (TS 3526)**

Kaba agreganın özgül ağırlığını bulmak amacıyla gradasyona uygun olarak ayarlanmış 500 gr. malzeme yıkanıp üzerindeki tozlardan arındırılır. Su içinde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılır, danelerin üzerinde gözle görülebilen su kalmayacak şekilde kurulanır ve tartılarak doymun 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 ( $W_3$ ). Aşağıdaki formüller yardımıyla kaba agreganın özgül ağırlığı ve su emme yüzdesi ( $m$ ) tespit edilir (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

$$G_k = \frac{W_3}{W_1 - W_2} \quad (3.1)$$

$$m_k = \frac{W_1 - W_3}{W_3} \times 100 \quad (3.2)$$

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 kaybedinceye 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 aşağıdaki bağıntılardan ince agreganın özgül ağırlığı ve su emme yüzdesi ( $m_{ince}$ ) saptanır (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

$$G_i = \frac{W_1}{W_2 + W_3 - W_4} \quad (3.3)$$

$$m_{ince} = \frac{300 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.4)$$

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 sağlanamadığından 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 aşağıdaki formülle fillerin özgül ağırlığı tayin edilir (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

$$G_f = \frac{M}{V} \quad (3.5)$$

## **3.2 BSK’larda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar**

Bitümlü sıcak karışımlar, agrega ve genellikle bağlayıcı olarak bitüm kullanılarak elde edilmektedir. Bitüm, karışımların ağırlıkça en fazla %5 – 7’sini oluştursa da karışımların özellikleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bitüm, agrega 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. Bitüm, doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesiyle elde edilmektedir (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1 Bitümün özellikleri**

#### **3.2.1.1 Bitümün kimyasal özellikleri**

Bitüm, organik bir madde olduğu için kimyasal yapıları farklılık göstermektedir. Genel olarak bitümler; %82 – 88 karbon, %8 – 11 hidrojen, %0 – 1 nitrojen, %1 – 6 sülfür, % 0 – 1,5 oksijen ve çok az miktarda metallere meydana gelmektedir (Tunç, A., 2004).

#### **3.2.1.2 Bitüm katılığının sınıflandırılması**

Normal şartlar altında katı halde bulunan bitümün katılık derecesi, penetrasyon veya viskozite değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Tablo 3.1, ülkemizde kullanılan bitümlerin yeni penetrasyon sınıflandırmasını göstermektedir (TS 1081 EN 12591, 2003).

**Tablo 3.1.** Ülkemizde kullanılan bitümlerin yeni penetrasyon sınıflandırılması.

Penetrasyon Miktarı	Yeni Penetrasyon Sınıfı
20 – 30 Pen. AC	B – 20/30
30 – 45 Pen. AC	B – 30/45
35 – 50 Pen. AC	B – 35/50
40 – 60 Pen. AC	B – 40/60
50 – 70 Pen. AC	B – 50/70
70 – 100 Pen. AC	B – 70/100
100 – 150 Pen. AC	B – 100/150
160 – 220 Pen. AC	B – 160/220
250 – 330 Pen. AC	B – 250/330
330 – 430 Pen. AC	B – 330/430
500 – 650 Pen. AC	B – 500/650
650 – 900 Pen. AC	B – 650/900

### **3.2.1.3 Bitümün özgül ağırlığı**

Bitümlerin özgül ağırlıkları elde edildikleri petrole bağlı olarak 25 °C’de 0,97 ile 1,05 arasında değişiklik göstermektedir. Yüksek penetrasyonlu bağlayıcıların özgül ağırlıkları genellikle düşük penetrasyonlu asfaltlara göre daha düşüktür (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.4 Bitümlerin hacimsel genişmesi**

Bitümün hacimsel genişmesi agregadan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bu sebepten ötürü, yetersiz boşluğa sahip BSK’larda, yüksek sıcaklıklarda bitüm agregadan daha fazla genişterek terlemeye neden olmaktadır. Ayrıca bitüm, derz dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, düşük ısılarda daha fazla büzülerek geçirimsizliğe, yüksek sıcaklıklarda ise derz dışına taşmaya neden olmaktadır. Bitümün hacimsel genişleme katsayısı yaklaşık  $6,1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ’dir (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.5 Bitümün ısı özellikleri**

Bitümlerin ısı iletkenliği agregaya göre daha düşük olduğundan daha geç ısınmakta ve soğumaktadır. Bu özellikten ötürü BSK'lar bağlayıcıya göre daha çabuk soğumakta bu da bitüm karışım içerisinde farklı büzülme kaynaklanan ilave gerilmelere sebep olmaktadır. Ayrıca bitüm 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 (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.6 Bitümlerin reolojik özellikleri**

Bitümler, hem yüke hem de yükleme süresine bağlı olarak yapılan reolojik sınıflandırmada viskoelastik malzeme grubuna girmektedir. Bu özellikten dolayı uygulanan yük ve yükleme süresine bağlı olarak BSK'da oluşan kalıcı deformasyon miktarı değişiklik göstermektedir. Ayrıca bitüm, termoplastik bir malzeme olduğundan yüksek sıcaklıklarda viskoz sıvı özelliği göstermektedir. Viskoelastik malzemeler, yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler, yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümün bu özelliği bitümlü sıcak karışımlara da yansımaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, bitümün ve BSK'nın rijitliğine doğrudan etki etmektedir (Kuloğlu, N., 2000).

### **3.2.1.7 Bitümlerin ısıya duyarlılığı**

Bitümler termoplastik malzemeler olduklarından viskozlukları ısıyla değişmektedir. Bağlayıcıların katılıklarının ısıya bağlı olarak değişmesi, ısıya karşı duyarlı olduklarının göstergesidir. Bitümlerin ısıya duyarlılığının düşük olması yani yüksek hava sıcaklıklarında yeterince katı, düşük hava sıcaklıklarında ise yeterince esnek olması istenmektedir. Aksi halde BSK'lar yüksek ısılarda

deformasyon, düşük ısılarda ise çatlama eğilimi gösterirler. Bağlayıcıların ısıya duyarlılığı penetrasyon indeksi (PI) ile tanımlanmaktadır. Yumuşama noktasına ve penetrasyon değerine bağlı olarak bitümlerin penetrasyon indeksleri belirlenebilmektedir (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.8 Bitümlerin kohezyonu**

Bitümlerin kohezyon mukavemeti, düşük ısılardaki duktiliteleri ile karakterize edilmektedir. Duktilite deneyi standardındaki sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerle kohezyonda meydana gelen değişiklik tespit edilebilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda duktilite değerleri arasındaki farkın fazla olmaması istenmektedir. BSK'larda düşük sıcaklıklarda yeterli gevreklik sağlanmadığı takdirde düşük ısı çatlakları meydana gelmektedir (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.9 Bitümlerin çekme dayanımı**

Bitümler viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduklarından dolayı çekme mukavemetleri de ısıya ve yükleme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcıların rijitliği düşük olduğu için çekme gerilimleri altında kopmalar meydana gelmezken düşük sıcaklıklarda rijitlik fazla olduğundan bu tip deformasyonlar görülebilmektedir (Tunç, A., 2004).

### **3.2.1.10 Bitümlerin adezyonu**

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi, agrega daneleri arasındaki bitüm/bağ kuvvetine bağlıdır. Bu bağ kuvveti ise agrega danelerini saran bağlayıcı filmin agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitüm 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 (Tunç, A., 2004).

### **3.2.2 Bağlayıcı üzerinde yapılan deneyler**

Bitümlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bağlayıcı üzerinde çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bağlayıcıların kıvamını belirlemek amacıyla penetrasyon, yüksek sıcaklık davranışlarını belirlemek amacıyla yumuşama noktası ve depolama, taşıma ve serme sırasında bitüm ile modifiyer arasında faz ayrışmasının olup olmadığını tespit eden depolama stabilitesi deneyleri yapılmaktadır. Ayrıca, bitümlü bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri ve PG sınıfı tespit eden Dinamik Kesme Reometresi Deneyi (DSR) ve karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılan Dönel Viskozimetre (RV) deneyleri uygulanmaktadır.

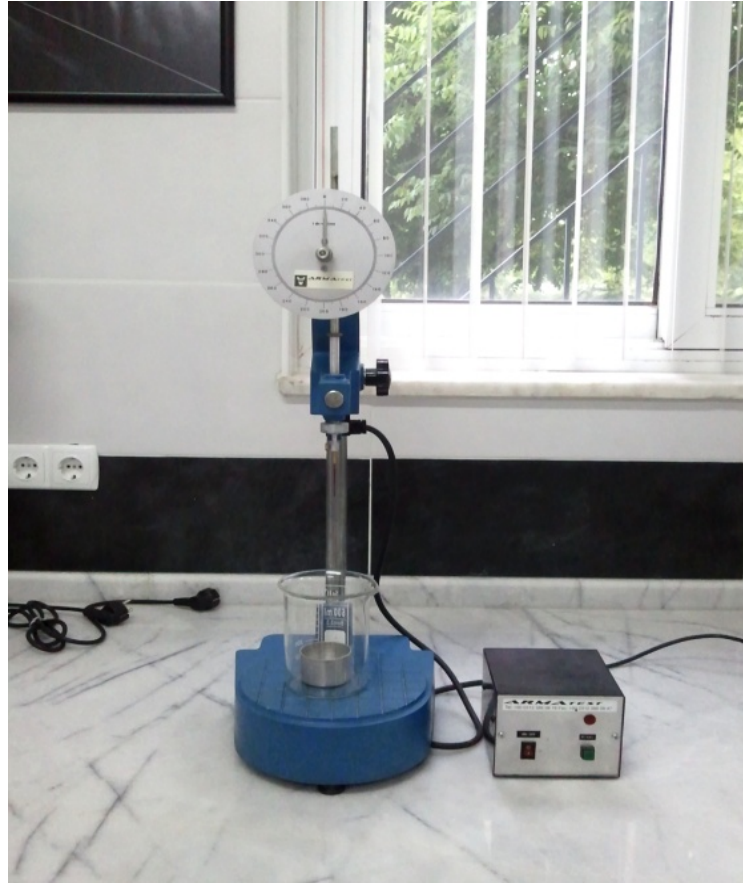
#### **3.2.2.1 Penetrasyon deneyi (TS EN 1426)**

Penetrasyon deneyi ile bitümün sertlik veya kıvamı tayin edilir. Bitümün kıvamı arttıkça karışım içerisindeki agregalar birbirine daha kuvvetle bağlanırlar. Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar.

Numune, aşırı ısınmalara sebebiyet vermeden kolayca dökülebilecek sıcaklığa getirilir. Numune hava kabarcıkları kayboluncaya kadar karıştırılıp numune kabına dökülür. Numune hazırlanmasında TS EN 1426'nın öngördüğü hususlardan hareket edilir. Bundan sonra ağzı kapatılıp tozdan korunarak 21 °C - 30 °C arasında olan bir yerde soğutulur. Numune 1-1.5 saat arasında soğutulduktan sonra taşıma kabı ile birlikte 25 °C'lik sıcaklıktaki su banyosuna

batırılır. Burada da 1-1.5 saat bekletilir. Penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilip, gösterge sıfıra getirilir. Numune kabını taşıyan taşıma kabı su ile dolu olarak penetrasyon cihazının tablasına yerleştirilir. 100 gr ağırlıkla yüklenen iğne, numunenin yüzeyine ancak degecek şekilde ayarlanır. Bu ayarlama yandan gönderilen ışık altında, iğne ucunun su içindeki görüntüsü ile birleştiği an tamamlanmış kabul edilir. İğne 5 saniye serbest bırakılıp, zaman bitiminde penetrasyon değeri göstergeden okunur. Kabın kenarından ve birbirlerinden 1'er cm uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. Bu okumalar en kısa zamanda arka arkaya yapılır. İğne, her seferinde uygun bir çözücü ile ıslatılmış bezle silinir.

Deney sonunda penetrasyon, hesaplanacak penetrasyon toleransından daha büyük farklar bulunmayan en az 3 deney neticesinin ortalamasıdır. Penetrasyonun birimi  $10^{-1}$  mm'dir. Penetrasyon deney aleti Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Penetrasyon deney aleti.

### **3.2.2.2 Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427)**

Bitümlerin yumuşama sıcaklığının tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilir ve bağlayıcı 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 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Yumuşama noktası deneyi.

### **3.2.2.3 Penetrasyon indeksi (PI)**

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir. Bu çalışmada Penetrasyon indeksini bulmak için (PI) Pfeiffer ve Van Doormal tarafından geliştirilen formül kullanılmıştır (Formül 3.6). Formüldeki  $Pen_{25}$ , bitümün 25 °C'deki penetrasyon değerini,  $T_{YN}$  ise yumuşama noktasını göstermektedir.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times T_{YN}}{50 \times \log(Pen_{25}) - T_{YN} - 120} \quad (3.6)$$

Burada;

*PI*: Penetrasyon İndeksi,

$\log(Pen_{25})$ : Bitümün 25 °C’deki penetrasyon değerinin logaritması,

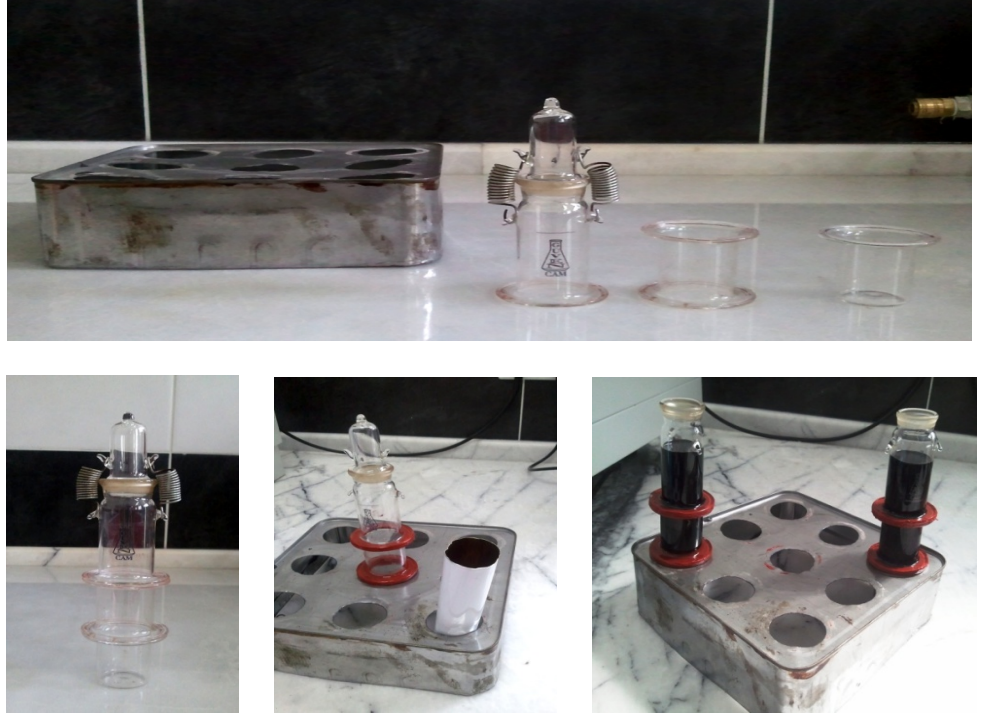
$T_{YN}$ : yumuşama noktasını göstermektedir,

### **3.2.2.4 Bitümün yüksek sıcaklıktaki depolama stabilitesi (TS EN 13399) deneyi**

Modifiye edilen bitümdeki bağlayıcı ile modifiyer arasındaki faz ayrışması genellikle kaplamanın depolama, pompalama ve kullanım sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple modifiye edilen bitümün depolama stabilitesinin araştırılması önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklık depolama stabilitesi testi modifiyerle bitümün karıştırılma ve depolanma sırasında faz ayrışımına yeterli direnç gösterip gösteremediğini tespit edebilmektedir. Deneyde, özel olarak imal edilen (160 mm yüksekliğinde ve 30 - 40 mm çapında) depolama stabilitesi tüpüne modifiye bitüm konulmakta ve tüp 180 °C’ye ayarlanmış etüvde 72 saat boyunca bekletilmektedir. Süre sonunda tüp içerisindeki bitüm oda sıcaklığında soğumaya bırakılmaktadır. Soğuyan depolama stabilitesi tüpü, alt, orta ve üst kısım olarak üç eşit parçaya bölünmekte, alt ve üst kısımlar üzerinde ayrı ayrı yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri yapılmaktadır. Gerçekleştirilen yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri sonrasında bu iki parça (alt ve üst) arasındaki fark modifiyeli bitümün depolama stabilitesine uygunluğunu ortaya koymaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğüne yayımlanan “Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi”ne göre, alt ve üst kısımlara ait yumuşama noktası değerleri arasındaki farkın +5 °C ve penetrasyon değerleri arasındaki farkın ise 12 dmm’den fazla olmaması gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan depolama stabilitesi tüpleri, laboratuvar şartlarına ve standartlara uygun ebatlarda üç parçalı cam şeklinde özel olarak imal edilmiştir.

Kullanılan tüplerin resimleri aşağıdaki Şekil 3.4'te verilmiştir (TS EN 13399, 2010).



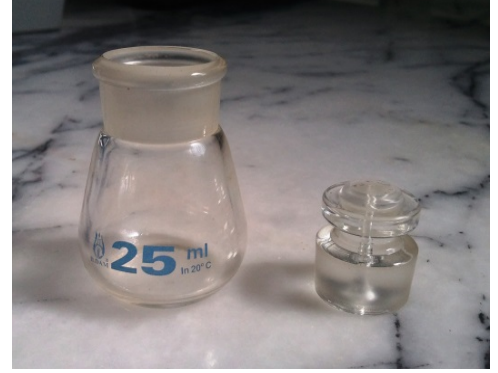
Şekil 3.4. Laboratuvar şartlarına uygun olarak üretilen depolama stabilitesi tüpü.

### **3.2.2.5 Özgül ağırlık (TS EN 15326) deneyi**

Hacmi bilinen (yaklaşık 25ml), vakum özellikli kapağa sahip bir kap ve saf su yardımıyla bitümün özgül ağırlığı bulunabilmektedir. Kabin kapağıyla birlikte boş ağırlığı alınır (A). Kap, tamamen saf su ile doldurulur, kapağı iyice kapatılır, 25 °C'ye ayarlanmış su banyosunda en az 30 dakika bekletilir. Daha sonra kap sudan çıkartılır ve sıcaklığın fazla değişmemesi için dışı kuru bezle çabucak kurutulur ve tartılır (B). Kaptaki su uzaklaştırılarak kurutulur ve yüzeyde boşluk kalacak şekilde kap önceden ısıtılmış bitüm ile doldurulur (yaklaşık 4/3). Numune en az 40 dakika kadar soğutulduktan sonra tartılır (C). Kabin bağlayıcı üzerindeki boşluk hacmini belirlemek amacıyla saf su eklenir ve üzeri kapakla kapatılarak tartılır (D). Her bir tartım işlemi yapılmadan önce numunenin 25 °C'de olmasına dikkat edilir. Aşağıdaki bağıntılardan faydalanarak bitümün özgül

ağırlığı  $G_b$  tespit edilir. Bu deneyde kullanılan kabın resimleri Şekil 3.5’de verilmiştir.

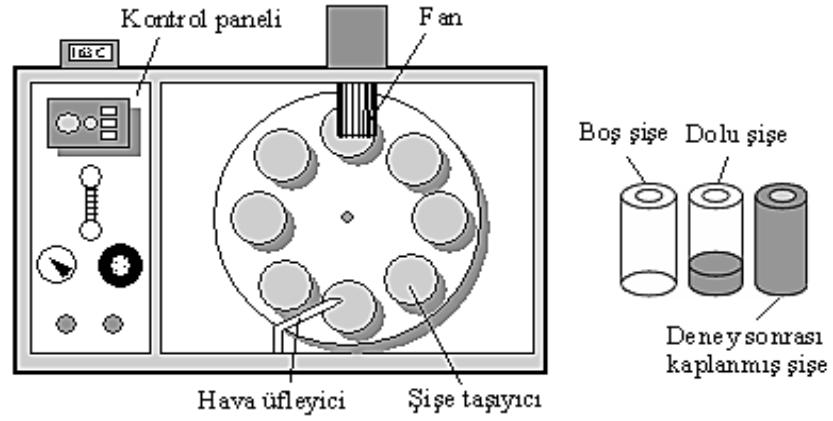
$$G_b = C - A / [(B - A) - (D - C)] \quad (3.7)$$



Şekil 3.5. Bitüm özgül ağırlık kabı.

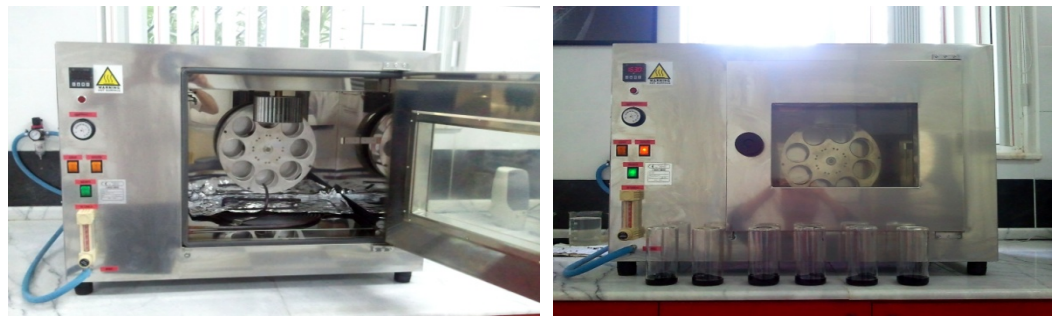
### **3.2.2.6 Dönel ince film etüvü (RTFO) deneyi (TS EN 12607-1)**

Bitümlü bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFO), TS EN 12607-1 şartnamelerine göre yapılmaktadır. Deneyde, ince bir film halinde hareket eden bitüm bağlayıcıda, sıcaklık ve havanın etkisiyle uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve deneyden sonra yaşlanmış olarak elde edilen bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Tunç, A., 2001; Kennedy, T.W., and at al., 1994; Zaniewski, J.P et al., 2004). Deney aleti Şekil 3.6’da şematik olarak gösterilen elektrikle beslenen bir ısı iletim sistemi bulunan 163 °C’lik ısıya sahip bir etüv, etüvün içerisine silindirik cam şişeleri yerleştirmek için monte edilmiş dönen tablası bulunan bir taşıyıcı ve şişelere hava püskürtmeye yarayan bir hava üfleyici parçaya sahiptir.



Şekil 3.6. Dönel ince film etüvü (RTFO) aleti şematik görünüşü.

Deneyde kullanılacak 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış  $35 \pm 0,5$  gram asfalt bağlayıcı numunesi doldurularak dönen tabla üzerine yerleştirilir ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülür. Dönme esnasında etüvün en alt konumunda bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere akışı  $4000 \pm 200$  ml/dakika olacak şekilde hava püskürtülür. Sıcaklık, dönme hareketi ve hava üfleme etkisiyle bitüm şişe içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanmaktadır (Dinç, E., 1999). Bu deneyin yapıldığı aletin ana görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Dönel İnce film etüvü (RTFO) aleti.

RTFO etüvü kullanılmadan önce 1 saat uygulama sıcaklığı olan  $163 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılır ve termostat, bitüm numuneleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra 10 dakika içerisinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde ayarlanır. Numuneleri deneye hazırlamak için bağlayıcı akışkan hale gelinceye kadar  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 'yi geçmeyecek

şekilde ısıtılır ve 8 adet şişe yukarıda ifade edildiği gibi doldurularak deney aletine yerleştirilir ve deney başlatılır. Deneyden sonra, bu şişelerden 6 tanesi başka bir kaba boşaltılır ve daha sonra basınçlı yaşlandırma kabı ve dinamik kesme reometresi deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Geriye kalan iki adet şişe de oda sıcaklığında soğutularak, bağlayıcıda oluşan kütle kaybının tespit edilmesi amacıyla 0,001 gram hassasiyetle tartılır ve numuneler atılır. Kütle kaybı, RTFO deneyinden sonra iki numunenin kütlelerinde yüzde olarak oluşan kayıp olarak açıklanır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Tunç, A., 2001):

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = [(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}) / \text{İlk Kütle}] \times 100 \quad (3.8)$$

Deneyin değişik metotlarına göre izin verilen gecikme süresi dahilinde ve numune tekrar ısıtılmadan, sertleşmiş bağlayıcının özellikleri tayin edilmelidir. Sertleştirilmiş bağlayıcının, 25 °C'deki iğne batma derinliği,  $P_2$ , halka ve bilye yumuşama noktası,  $T_2$  olarak verilir. Sertleşme işleminden sonra fiziksel özelliklerdeki değişimler aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır (Dinç, E., 1999).

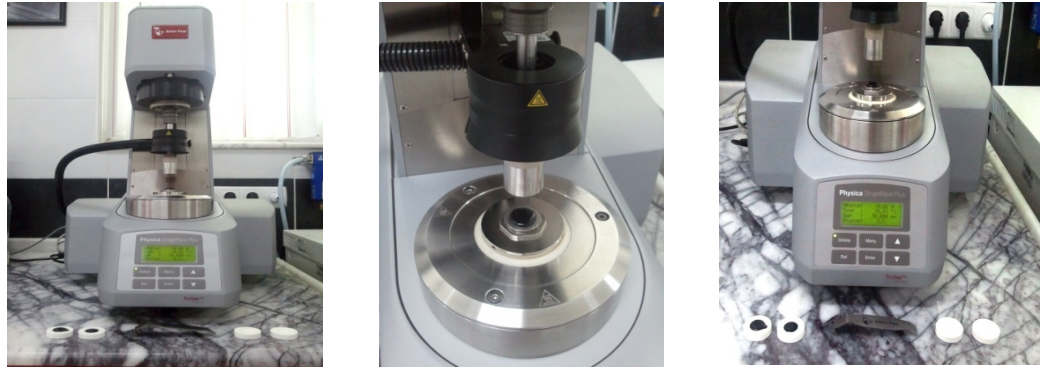
$$\text{Kalan İğne Batma Derinliği Yüzdesi, 25 °C'de} = 100 \times (P_1 - P_2) / P_1 \quad (3.9)$$

$$\text{Halka ve Bilye Yumuşama Noktasındaki Artış} = T_2 - T_1 \text{ (°C)} \quad (3.10)$$

Kütle kaybı; bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybindan ibaret olup bitümün taşıma, depolama, ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin bir göstergesidir. Kütledeki bir azalma veya özellik değerindeki bir azalma (oran olarak verilenler hariç) negatif değer veya negatif yüzde değişimi olarak ve kütledeki bir artış veya özellik değerindeki bir artış (oran olarak verilenler hariç) pozitif değer veya pozitif yüzde değişimi olarak kabul edilir (Türk Standartlar Enstitüsü, 2003).

### **3.2.2.7 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi (TS EN 14770)**

Geleneksel deney yöntemlerinde bağlayıcı özelliklerini belirlemek için farklı deney yöntemleri bulunmasına rağmen, bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik davranışının bir arada dikkate alındığı herhangi bir deney bulunmamaktadır. DSR aleti, bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla bu iki faktör göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bağlayıcının davranışı yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olduğundan, SHRP tarafından geliştirilen DSR deneyi ile bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (kompleks kayma modülü, faz açısı vb.) karakterize edilmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B., et al., 1994). Bu aletin genel bir görüntüsü Şekil 3.8'de verilmiştir.

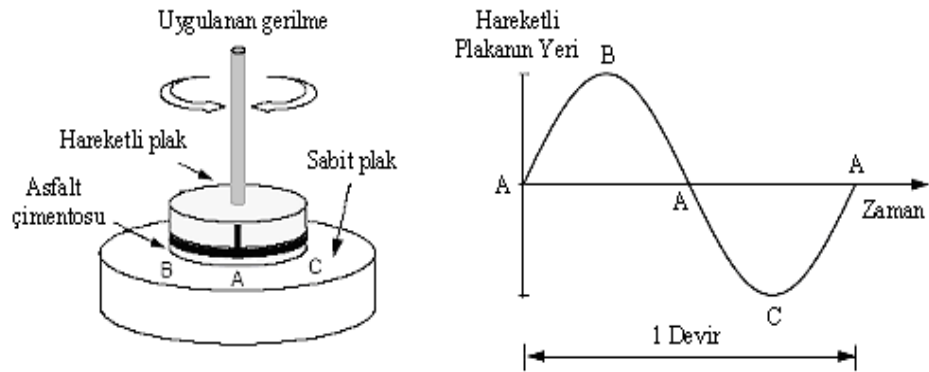


**Şekil 3.8.** DSR (Anton Paar Smart Pave Plus 301) aletinin genel görüntüsü.

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının yapımdan hemen sonra tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesini sağlamakta ve ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirebilmektedir. Ayrıca, servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlak oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır (Zaniewski, J.P. et al., 2004). DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (sinüsoidal) yüklemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı test frekanslarında elde edilebilmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994). DSR deneyinde, bitüm numunesinin sinüsoidal

gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (kayma sertliği) ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) hesaplanmaktadır. Viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma modülü ve faz açıları, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski, J.P. et al., 2004).

DSR deneyinde bitüm numunesi Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, sabit bir plaka ile sola ve sağa küçük dönme hareketleri (salınım) yapabilen bir plaka arasına sabit kalınlıkta yerleştirilerek belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya uygulanan gerilme veya deformasyon ile tabla A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra döner tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Döner tablanın bu hareketine bir devir denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994).



Şekil 3.9. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli.

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta ( $\omega$ ) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/saat trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır (Kennedy, T.W. et al., 1994). 10 rad/sn'lik sabit frekans (3.12) bağıntısı kullanıldığında yaklaşık 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekansa ( $f$ ) ve (3.13) bağıntısı kullanıldığında 0,1 sn yükleme süresine ( $t$ ) eşit olmaktadır. Yükleme süresi, kaplama üzerinden 50 mph. hızla hareket eden bir kamyon tekerleğinin

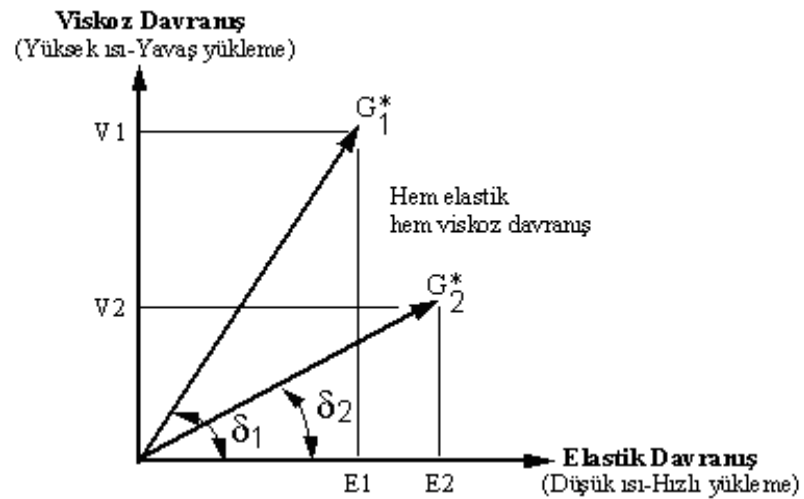
geçmesinden kaynaklanan yüklenme zamanını ifade etmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004).

$$\omega = 2\pi f \quad (3.11)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (3.12)$$

Gerilme ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki tip dinamik kayma reometresi bulunmaktadır. Gerilme kontrollü reometreler, sinüsoidal gerilmeler uygulayarak oluşan deformasyonları belirlemektedir. Deformasyon kontrollü reometreler ise sinüsoidal deformasyonlar uygulayarak oluşan gerilmeleri belirlemektedir. Superpave bağlayıcı deneyleri gerilme kontrolü ile teste tabi tutulur (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994).

Dinamik kesme reometresi, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) ölçmek suretiyle hem viskoz hem de elastik davranışını tanımlamak üzere kullanılmaktadır. Kayma modülü ( $G^*$ ), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür ve elastik ve viskoz olmak üzere Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi iki bileşeni bulunmaktadır.



Çizelge 3.2. Viskoelastik davranış.

Faz açısı ( $\delta$ ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Kesme modülü ve faz açısı yükleme frekansı ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Bitüm bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranır ve bu durum Çizelge 3.2’de düşey ekseninde temsil edilmektedir. Yani faz açısı  $\delta = 90^\circ$  iken malzemenin kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda ise bağlayıcı, oluşan deformasyonların tamamen geri döndüğü elastik katılar gibi davranmaktadır. Bu durumu ise aynı grafikteki yatay eksen temsil eder ve bu da faz açısı  $\delta = 0^\circ$  iken malzemenin kompleks kayma modülünün ( $G^*$ ) viskoz bir özellik taşımadığı anlamına gelir (Tunç, A., 2001).

Normal kaplama sıcaklıkları ve trafik yükleri altında bitümlü bağlayıcı viskoz sıvı ve elastik katı özelliklerini bir arada taşır. Kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) değerlerinin ölçülmesi suretiyle DSR deneyi asfalt üstyapının hizmet sıcaklığındaki özelliklerinin tahminini mümkün kılmaktadır. Grafikte belirtilen  $G_1^*$  ve  $G_2^*$  vektörleri iki farklı bağlayıcının kompleks kayma modülünü temsil etmektedir. Bu bağlayıcıların yük altındaki deformasyonları hem elastik (E) hem de viskoz (V) davranış gösterdiğinden viskoelastik malzeme olarak değerlendirilir. Ancak her iki bitüm de viskoelastik olmasına rağmen, bitüm 2 daha küçük faz açısına sahip olmasından dolayı bitüm 1’e göre daha elastik bir malzemedir. Elastik davranış bileşeninin daha büyük olması nedeniyle bitüm 2’nin yük altındaki deformasyonları yük kaldırıldıktan sonra daha fazla miktarda geri dönecektir. Bu örnek, kayma modülü ( $G^*$ ) değerinin tek başına bitümün davranışını açıklayamayacağını, faz açısı ( $\delta$ ) değerinin de gerekli olduğunu açıkça göstermektedir (Tunç, A., 2001). Kompleks kayma modülü ( $G^*$ ), toplam kayma gerilmesinin ( $\tau_{maks} - \tau_{min}$ ), toplam deformasyona ( $\gamma_{maks} - \gamma_{min}$ ) oranı olarak (3.14) bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$G^* = \frac{|\tau_{maks} - \tau_{min}|}{|\gamma_{maks} - \gamma_{min}|} \quad (3.13)$$

DSR yazılımı tarafından kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ve kayma deformasyonu ( $\gamma$ ) değerlerinin hesaplanması, bitüm numunesinin DSR aletinde yerleşimini temsil

eden Şekil 3.10'da belirtilen parametreler kullanılarak (3.15) ve (3.16) bağıntıları ile yapılmaktadır.

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (3.14)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (3.15)$$

Burada;

$\tau$ : Kayma gerilmesi (Pa),

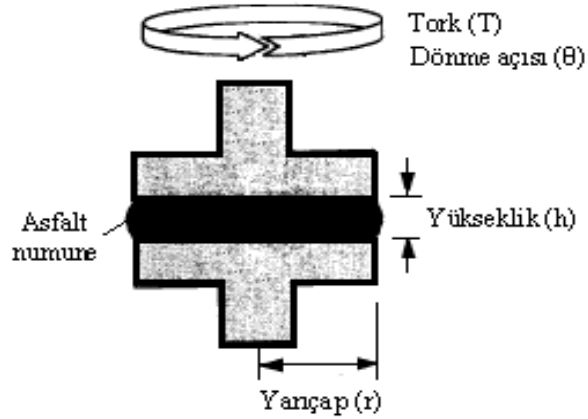
$\gamma$ : Kayma deformasyonu (%),

T: Uygulanan tork (N.m),

r: Numunenin yarıçapı (12,5 mm veya 4 mm),

$\theta$ : Dönme açısı (rad),

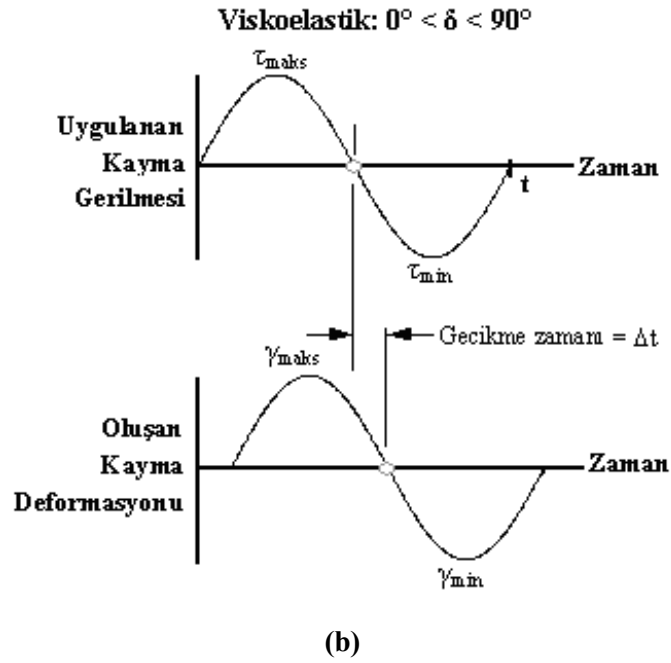
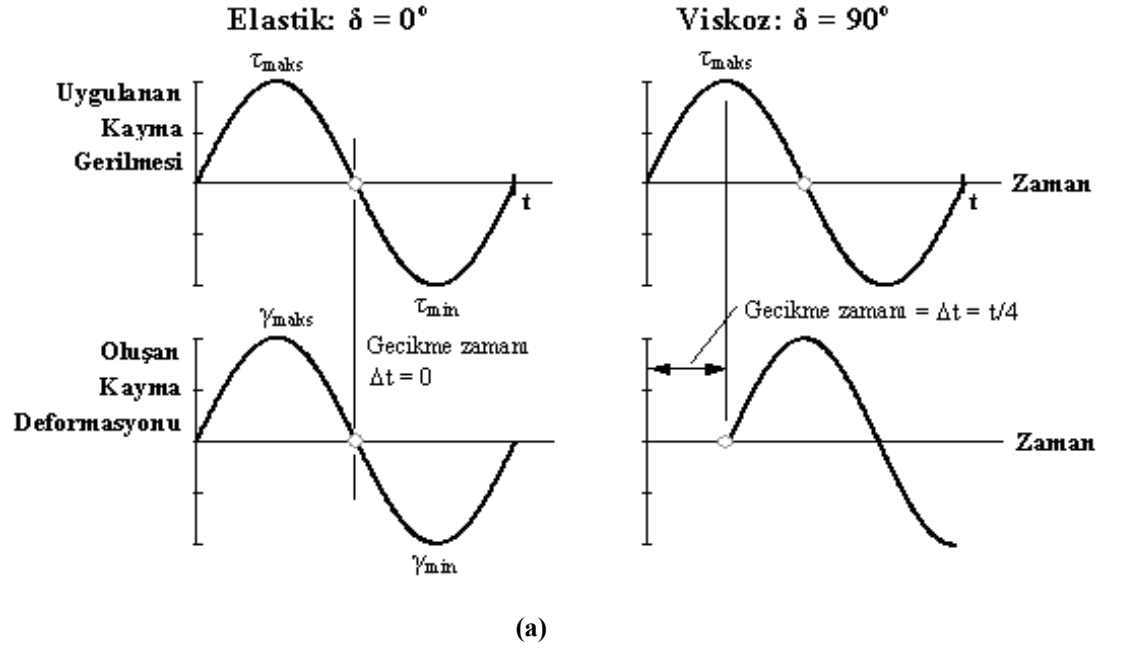
h: Numunenin yüksekliği (1mm veya 2 mm)'dir.



Şekil 3.10. DSR bitüm numunesi.

Faz açısı ( $\delta$ ) ise uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına ( $\Delta t$ ) eşit olmaktadır. Bağlayıcının viskoelastik yapısından dolayı numuneye uygulanan gerilmeler ilk etapta numune tarafından karşılanmakta ancak belirli bir süre sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının  $0^\circ$  olması numunenin tam elastik davranış gösterdiğini,  $90^\circ$  olması ise

tam viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir (Çizelge 3.3, a). Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında değişecektir (Çizelge 3.3, b). Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir (Kennedy, T.W. et al., 1994; McGennis, R.B. et al., 1994).



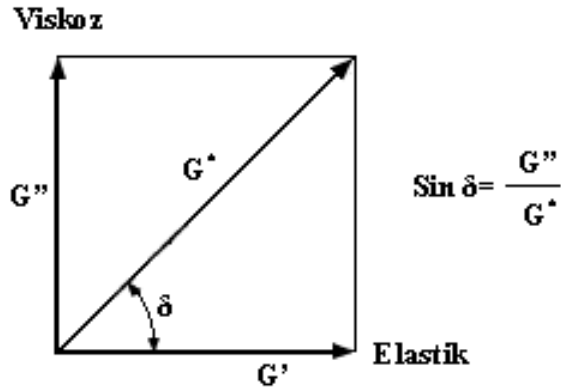
Çizelge 3.3. Gerilme- deformasyon ilişkileri: (a) Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi, (b) Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi.

Gerilme kontrollü testlerde faz açısı ( $\delta$ ), uygulanan kayma gerilmesi ve oluşan kayma deformasyonu arasındaki gecikme zamanından tespit edilmektedir. Faz açısı ( $\delta$ ), gecikme zamanı ( $\Delta t$ ) ve devir süresine ( $t$ ) bağlı olarak aşağıda belirtilen (3.17) veya (3.18) bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır (Kennedy, T.W. et al., 1994).

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 360^\circ, \text{ (derece)} \quad (3.16)$$

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 2\pi, \text{ (radyan)} \quad (3.17)$$

Kayma modülüne bağlı olarak faz açısının değişimi grafiksel olarak Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.



Çizelge 3.4. Kayma modülünün bileşenleri.

Kompleks kayma modülü; kayıp modül ( $G''$ ) ve depolama modülü ( $G'$ ) bileşenlerinden oluşmaktadır. Elastik bileşeni ifade eden depolama modülü her bir yükleme devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını göstermektedir. Viskoz bileşeni ifade eden kayıp modül ise her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir. Faz açısı  $0^\circ$  olduğunda numune tamamen elastik davranış göstereceğinden kompleks kayma modülü depolanan modüle, faz açısı  $90^\circ$  olduğunda ise viskoz davranıştan dolayı kompleks kayma modülü kayıp modüle eşit olacaktır. Bu sebeple, şekilde görüldüğü gibi viskoelastik özellik  $G^*$  ve  $\delta$ 'a bağlı olduğundan, bitümün

viskoelastik özelliği,  $G^*$  ve  $\delta$  birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir (Kennedy, T.W. et al., 1994; Zaniwski, J.P. et al., 2004).

DSR deneyinde, sabit ve çıkarılıp takılabilen hareketli plaka ile disk şeklindeki bitümlü bağlayıcı numuneye gereksinim vardır. Deneylerde, plakalar arasındaki aralık yüksekliğine göre iki farklı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve aralık yükseklikleri deneyde kullanılacak bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilir. Buna göre orijinal veya işlem görmemiş ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılarda 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2000 mikron (2 mm) aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Bitüm numunesi yerleştirilmeden önce plakalar arasındaki aralık gerekli değerden 50 mikron (0,05 mm) büyük olacak şekilde ayarlanır.

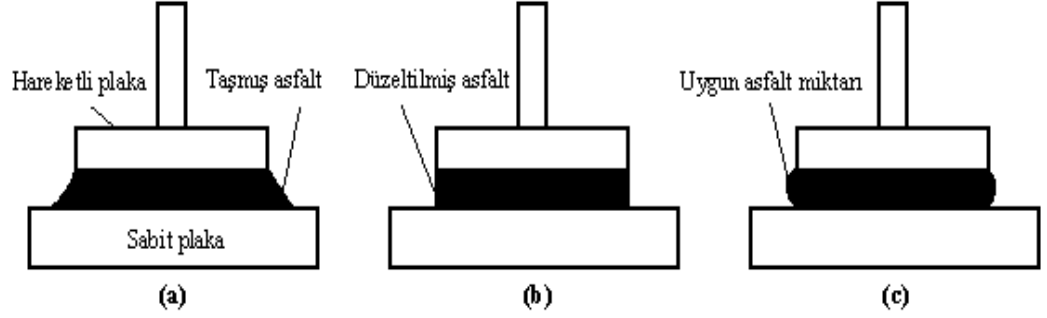
DSR deneyinde deney sıcaklık aralığı, bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46 ile 82 °C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV’da yaşlandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4 ile 40 °C arasında değişmektedir. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak kayma gerilmesi veya kayma deformasyonu değeri hedef verisi olarak bilgisayara girilmelidir (Zaniwski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994). Bağlayıcının yaşlanma durumuna göre bilgisayara girilen bu değerler Tablo 4.6’da verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri.

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

Deney numunesini hazırlamak için bitümlü bağlayıcı akıcı hale gelinceye kadar (130 – 140 °C) ısıtılır. Modifiye bağlayıcılar daha fazla sıcaklık gerektirirler ancak ısıtma sıcaklığı 163°C’yi geçmemelidir. Numune hazırlanırken, bitüm ya doğrudan sabit plaka üzerine dökülür ya da yaygın olarak kullanılan silikon kalıp içerisine dökülerek soğutulduktan sonra plakalar arasına yerleştirilir. Her iki

şekilde de bitüm numunesi yerleştirildikten sonra, üst plaka aşağı indirilerek numune sıkıştırılır ve iki plaka arasında taşan kısım temizlenir. Daha sonra, deney öncesi 50 mikron fazla bırakılan aralık indirilerek gerekli deney aralığına getirilir (Şekil 3.11) (McGennis, R.B. et al., 1994; Warren, R.S. et al., 1994).



Şekil 3.11. DSR bitüm numuneleri; a) Taşmış şekli, b) Düzeltilmiş şekli, c) Deneye hazır şekli.

Deneye hazır hale getirilen numune Smart Pave Plus 301 aletine mahsus PLT sistemi yardımıyla 0,1 °C hassasiyetle deney sıcaklığına getirildiğinde bu sıcaklıkta ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilir. On dakikalık denge periyodunun sonunda Superpave şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/san frekansta gerekli gerilme veya deformasyon uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmaktadır. 10 devirlik hazırlıktan sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilir. Reometre yazılımı tarafından otomatik olarak uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) değerleri hesaplanır (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994).

### **3.2.2.8 Dönel viskozimetre (RV) deneyi**

Dönel viskozimetre deneyi, bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Brookfield aparatı gibi dönel silindir mil viskozimetrelere göre daha sık kullanılmaktadır. Bazı bitüm birimleri bu ölçüme “Brookfield viskozitesi”

demektedir. Brookfield termosel aleti kullanılarak bitümlü bağlayıcıların Brookfield viskozitesinin ölçüm yöntemi, ASTM D 4402 standardında açıklanmış ve detaylandırılmıştır (Zaniewski, J.P. et al., 2004). Brookfield aletinin ana görünüşü Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılmakta ve bağlayıcının 135 °C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994).



(a)



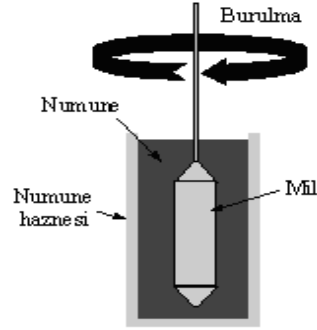
(b)



(c)

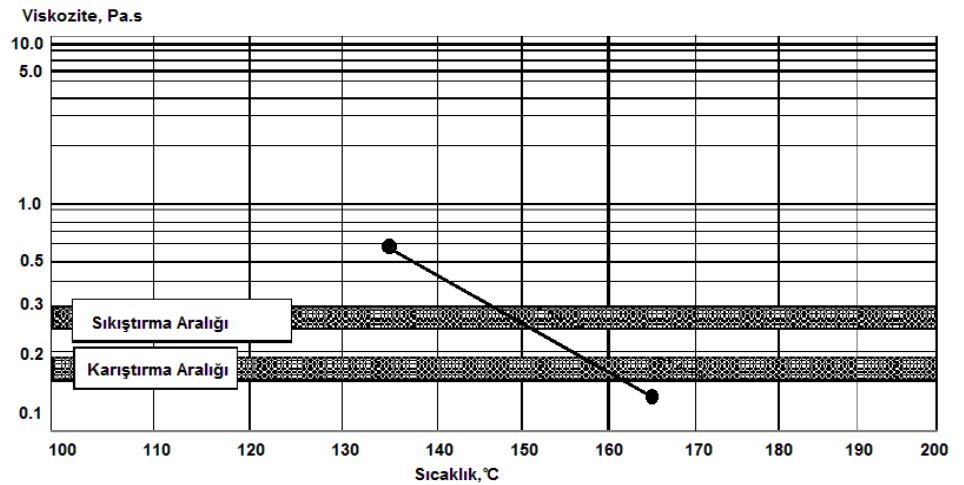
**Şekil 3.12.** “Brookfield DV-II+Pro EXTRA” RV Cihazının ana görüntüsü ve onun tüpü, silindirik mili ve teli(a), Cihazın ana ekranı (b), Brookfield termosel aleti (c).

Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta bitümlü bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir (Şekil 3.13). Bu burulma kuvveti, viskozimetre tarafından belirlenen bağlayıcı viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir (McGennis, R.B. et al., 1994).



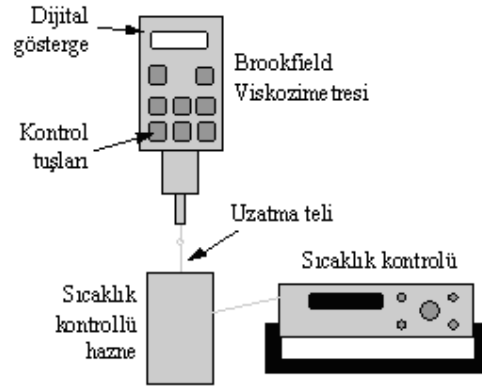
Şekil 3.13. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması.

Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Çizelge 3.5’de tipik bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994).



Çizelge 3.5. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi.

Dönel viskozimetre, Şekil 3.14’de şematik olarak gösterildiği gibi Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere başlıca iki ana ünitelerden oluşmaktadır. Viskozimetre; motor, mil, kontrol paneli ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Motor, milin kendi etrafında dönmelerini sağlayan burulma kuvvetini üretmektedir. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm.) hızla döndürülürken, viskozluk değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır. Şakule topuzuna benzeyen silindirik mil, viskoz haldeki bağlayıcı içerisinde dönerken dirençle karşılaşmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların viskozite değeri tayininde No. 21 ve No. 27 olarak numaralandırılan iki çeşit mil kullanılmakla birlikte yaygın olarak No. 27 mili tercih edilmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; McGennis, R.B. et al., 1994).



Şekil 3.14. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem.

Termosel sistemi; sıcaklık kontrollü bölme, numune kabı ve sıcaklık kontrol panelinden oluşmaktadır. Numune kabı, paslanmaz çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Numune kabını çıkarmak veya yerleştirmek amacıyla özel bir pense kullanılmaktadır. Sıcaklık kontrollü bölme ise numune kabını içine almaktadır. Sıcaklık kontrol paneli deney için gerekli olan sıcaklıkların (135 ve 165 °C) teminini sağlamaktadır. Sistemde uygulanan burulma ve dönme hızı dijital göstergeden ya da bilgisayardan okunabilmektedir. Kontrol paneli mil numarası, dönme hızı gibi parametrelerin girilmesinde ayrıca deneyin başlatılıp sonlandırılmasında kullanılmaktadır. Aletin bilgisayara bağlı olması durumunda bu işlemler yazılım üzerinden de yapılabilmektedir. Sonuçların doğru bir şekilde

elde edilebilmesi için viskozimetre aleti ve termosel sistem, terazi kullanılarak ayar vidaları ile düzenlenmelidir.

Bitümlü bağlayıcıların çoğu 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Newton sıvısı şeklinde davranış göstermektedir (Bahia, H.U. et al., 1995). Newton sıvısı, viskozitenin kayma deformasyonu oranından bağımsız olduğunu, tamamen viskoz davranışla karakterize edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda tamamen viskoz davranış sergilediklerinden karıştırma ve sıkıştırma sırasında bağlayıcının işlenebilirliğinin karakterize edilmesinde viskozite ölçümü yeterli gelmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004).

RV deneyinde, kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ile burulma (M) ve kayma oranı ( $\dot{\gamma}$ ) ile açısal hız ( $\omega$ ) arasındaki ilişkiler aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994).

$$\text{Kayma oranı (s}^{-1}\text{); } \dot{\gamma} = \omega \left[ \frac{2R_c^2}{(R_c^2 - R_s^2)} \right] \quad (3.18)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi (din/cm}^2\text{); } \tau = \frac{M}{2\pi R_s^2 L} \quad (3.19)$$

Burada;

$\omega$  : Sabit mil hızı (rad/s),

$R_c$ : Numune kabının çapı (0,9525 cm),

$R_s$ : Milin çapı (No:27 için 1,176 cm),

$M$ : Uygulanan burulma (din.cm),

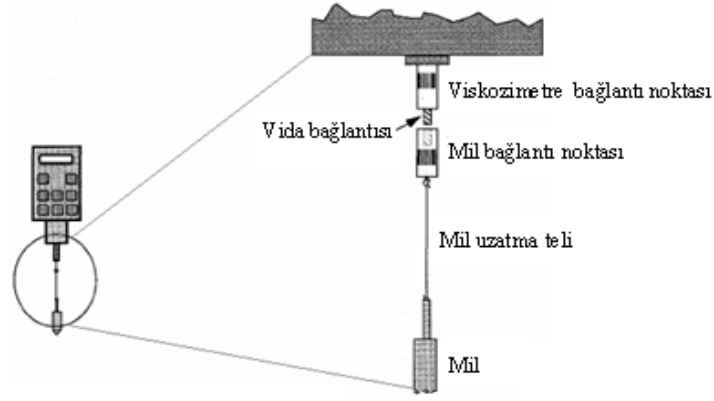
$L$ : Milin efektif uzunluğu (No:27 için 3,302 cm)'dur.

Asfaltın viskozite değeri santipois (cP) olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.20)$$

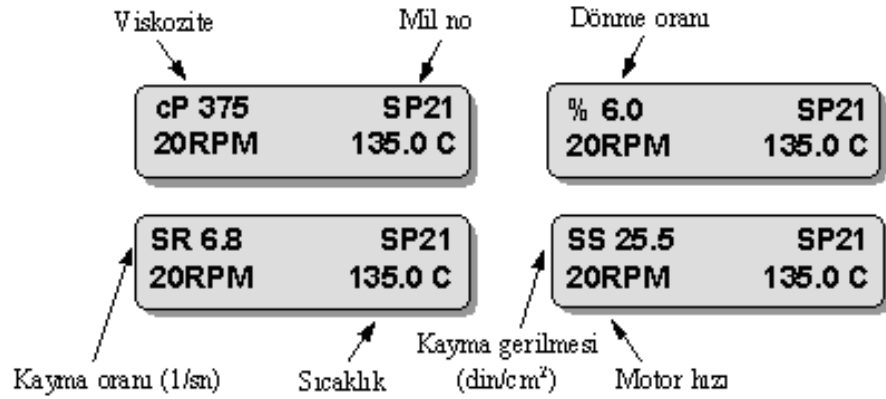
RV deneyinde sistem tarafından hesaplanan viskozite değeri santipois (cP) biriminde iken, performans esaslı bağlayıcı sınıflamasında paskal.saniye (Pa.s) birimi kullanılmaktadır. Bu amaçla, dönüştürme için “1000 cP = 1 Pa.s” eşitliği esas alınmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre 135 °C sıcaklıkta elde edilen viskozite değeri 3 Pa.s’yi aşmamalıdır (McGennis, R.B. et al., 1994). Superpave sistemini oluşturan SHRP çalışmaları sırasında karıştırma ve sıkıştırma için yeni bir viskozite şartnamesi oluşturulmamıştır. Yirmi seneyi aşkın bir süredir kullanılan karıştırma için  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırma için  $280 \pm 30$  cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması şartnamede aynen yer almıştır. Sadece kullanılan birim sistemi değiştirilmiş, paskal.saniye birimine göre karıştırma için  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s, sıkıştırma için ise  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s viskozite aralıkları tavsiye edilmiştir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Yildirim, Y. et al., 2000).

Deneye tabi tutulacak 30 gr kadar bitüm numunesi etüvde 150 °C’nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılan bitüm, daha önceden belirli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabının içerisine, deneyde kullanılacak silindirik milin boyutuna göre 8 – 11 gr arasında dökülür. İçerisinde bitüm bulunan numune kabı önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994). Deney parametreleri sisteme girildikten sonra, öncelikli olarak viskozimetrenin bağlantı noktasında bulunan vida ile silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak viskozimetre sıfırlanır (Şekil 3.15). Daha sonra, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki bitüm içerisine daldırılır (Warren, R.S. et al., 1994). Deney için, 135 °C’lik sabit bir numune sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık 30 dakika kadar beklenir. Bekleme periyodu boyunca silindirik milin dönme hızı 20 rpm olarak ayarlanır ve motor çalıştırılarak viskozite ve dönme (tork) oranı gözlemlenir. Şayet dönme oranı %2 ile %98 arasında bir değerde değilse farklı boyutlu bir silindirik mil gerekebilir. Numune sıcaklığı dengeli bir duruma geldikçe, viskozite okumaları da sabitleşmeye başlar ve birer dakika aralıklarla üç okuma yapılarak deney sonuçları kaydedilir (Warren, R.S. et al., 1994).



Şekil 3.15. Viskozimetre ve mil bağlantısı.

Deney boyunca viskozimetre dijital ekranında Şekil 3.16'da görülen deney bilgileri verilmektedir. Burada sadece dijital göstergenin sol üst köşesindeki değerler deney esnasında değişmektedir.



Şekil 3.16. Dönel viskozimetre (RV) göstergesi.

Karıştırma ve sıkıştırma sırasında, işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerini sağlayan sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Asfalt enstitüsü, bu amaçla ilk deneyin 135 °C'de ikincisinin ise 165 °C sıcaklıkta yapılması gerektiğini belirtmiştir. Başlangıçta düşük sıcaklıkta deney yapılmasının tercih edilmesinin sebebi sıcaklık kontrollü numune bölmesinde soğumaya nazarın ısınmanın daha hızlı meydana gelmesidir. Böylece deneyler daha kısa bir

sürede bitirilebilmektedir. Farklı iki sıcaklıkta belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretilenerek karıştırma ve sıkıştırma için tavsiye edilen viskozite değerlerini sağlayacak sıcaklık aralıkları belirlenmektedir (Zaniewski, J.P. et al., 2004; Petersen, J.C. et al., 1994).

## **4. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK)**

Bitüm ve agreganın her ikisinin de ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilen karışımlara bitümlü sıcak karışımlar (BSK) denilmektedir. BSK'lar kullanılarak yapılan kaplamalar içerisinde en iyi performans gösteren, gradasyonu tam olarak kontrol edilen ve bağlayıcı olarak bitüm kullanılan beton asfalt kaplamalardır.

### **4.1 BSK'ların Özellikleri**

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 gerekmektedir (Tunç, A., 2004).

#### **4.1.1 BSK'ların stabilitesi**

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 değerde olması istenmektedir. Stabiliteye etki eden faktörler kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direncidir. Kayma mukavemeti, agregalar tarafından sağlanan içsel sürtünme açısına ve bitüm tarafından sağlanan bağ kuvvetine bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda azalmakta, düşük sıcaklıklarda ise artmaktadır. Eylemsizlik direnci, karışımın trafik yükleri altında yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Yükün miktarı azaldıkça, yükleme süresi ve kaplama kalınlığı arttıkça eylemsizlik direnci de artmaktadır (Tunç, A., 2004). Stabilite, laboratuvar şartları altında Marshall stabilite deneyiyle tespit edilebilmektedir.

#### 4.1.2 BSK'ların rijitliği

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 ve ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu ve bitümün katılığı arttıkça karışımın rijitliği de artmaktadır (Tunç, A., 2004). Bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin tespiti için laboratuvarında sünme deneyi ve indirekt çekme deneyi yapılmaktadır.

#### 4.1.3 Bitümlü sıcak karışımların durabilitesi

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 oranının yükseltilmesiyle film kalınlıklarını arttırarak, yüksek kıvamlı bağlayıcı kullanarak, iyi bir sıkışma sağlayarak ve yoğun gradasyonlu ve sağlam agregalar kullanarak durabilitede artma sağlanabilmektedir (Tunç, A., 2004).

#### 4.1.4 BSK'ların yorulma mukavemeti

Karışımın, taşıyabileceği maksimum çekme mukavemeti aşılmadan, yorulma çatlakları oluşuncaya kadar geçirebileceği maksimum yük tekerrür sayısına yorulma mukavemeti denilmektedir. Yoğun gradasyonlu agregalar kullanılarak ve kaplama kalınlığı arttırılarak rijitliğin artması sağlanabilmektedir. Rijitliği yüksek olan karışımlarda deplasman az olacağından yorulma mukavemetinde artış sağlanacaktır. Ayrıca karışımda elastikiyeti sağlayan bağlayıcının miktarının arttırılması ve kıvamı düşük bağlayıcı kullanılmasıyla, daha esnek bir karışım elde edilmekte bu sayede de yorulma mukavemetinde artış sağlanmaktadır (Tunç, A., 2004).

#### **4.1.5 BSK'ların esnekliği**

BSK'larda yüksek sıcaklıklar için rijitlik ne kadar önemliyse düşük sıcaklıklar içinde esneklik o kadar önemlidir. Yeterli esnekliğe sahip karışımlar, düşük sıcaklıklarda eğilimden kaynaklanan çatlak oluşmasına izin vermeyerek kaplama ömründe artış sağlamaktadır. Ayrıca, yol eksenini yarma ve dolgulardan geçtiğinden dolgulardaki farklı oturmalarından kaynaklanan gerilmeler yeterli esnekliğe sahip karışımlar sayesinde karşılanabilmektedir (Tunç, A., 2004).

#### **4.1.6 BSK'ların geçirimsizliği**

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 tekerrürü sonucu agrega parçalanması artmaktadır. Bağlayıcı miktarı, sıkışma, agrega gradasyonunun ve karışımın yoğunluğu arttıkça geçirimsizlik genel olarak artmaktadır (Tunç, A., 2004).

#### **4.1.7 BSK'ların kayma direnci**

Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda savrulmaması için teker ile kaplama arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Kayma direnci genel olarak, düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek agrega, kırmataş veya pürüzlü yüzeyli agrega ve boşluklu gradasyon ile artmaktadır. Fakat kaplamanın kayma direnci arttıkça pürüzlülük artmakta bu nedenle de sürüş konforu azalmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda, pürüzsüz yüzeylerinden dolayı özellikle yağışlı havalarda keskin kurplarda ve eğimin fazla olduğu yerlerde sürüş emniyeti azalmaktadır. Kaplama üzerine, aşınma direnci yüksek tek boyutlu kırmataş serilip kaplamaya gömülmesi veya sathi kaplama uygulanması bu bölgeler için uygun çözümler olacaktır (Tunç, A., 2004).

## 4.2 Materyal ve Metot

Arazi şartlarını daha iyi bir şekilde laboratuvara yansıtılabilmek amacıyla birçok araştırmalar yapılmış ve birçok sıkıştırma yöntemi geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda arazi şartlarını en iyi şekilde laboratuvara taşıyan yöntemin Superpave yöntemi, sıkıştırma metodunun ise 1,25 derecelik dönel pres olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntem hala geliştirilmeye devam ettiğinden ülkemizde Marshall karışım dizayn metodu kullanılmaya devam etmektedir.

### 4.2.1 Marshall karışım dizayn metodu (TS 3720)

Marshall karışım dizayn metodunda aşınma ve binder tabakaları için farklı gradasyon limitleri bulunmaktadır. Optimum bitüm muhtevasını tespit etmek için belirli bir yüzdeden başlayarak ardışık olarak agreganın %0,5'i oranında artan en az 5 bitüm içeriğinde üçer numune hazırlanır. Bu yöntemde her bir numune için belirlenen gradasyona uygun olarak yaklaşık 1200 gr. agrega alınır. Hazırlanan agrega ve bitüm, 150 – 160 °C sıcaklıkta bekletilir. Belirli bir süre bu sıcaklıkta bekletilen agrega ve bağlayıcı, karıştırıcıya alınarak agrega daneleri tamamen bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır (Şekil 4.1). Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım kalıba doldurulur ve Marshall tokmağı yardımıyla sıkıştırılır (Şekil 4.2). Marshall tokmağında karışıma trafik seviyelerine bağlı olarak 50 veya 75 darbe uygulanır. Her iki tarafına darbe uygulanan numune soğumaya bırakılır (Şekil 4.3, a).



Şekil 4.1. Karıştırıcı.



Şekil 4.2. Marshall tokmağı.



(a)



(b)

**Şekil 4.3.** Tokmaktan çıkarılarak soğumaya bırakılan numune (a), Soğuduktan sonra kalıptan çıkarılan numune (b).

Kalıptan çıkarılan numuneler (Şekil 4.3, b) tartılır (A) ve oda sıcaklığında suyun içerisine bırakılarak 5 dakika beklenir. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeyde su kalmayacak şekilde kurulanır ve tartılarak doygun kuru yüzey ağırlığı alınır (B). Daha sonra numunelerin sudaki ağırlıkları alınır (C). Bu ağırlıklar, numunelerin özgül ağırlığının, boşluk oranının ve bitümlü dolu boşluk oranının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$V = B - C \quad (4.1)$$

$$D_p = A / V \quad (4.2)$$

$$D_{\text{Port}} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (4.3)$$

$$W_a = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (4.4)$$

$$W_b = \frac{M_b}{M_a + M_b} \times 100 \quad (4.5)$$

$$G_{\text{ag}} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}} \quad (4.6)$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{\text{ag}}} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (4.7)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{Port}}{D_T} \times 100 \quad (4.8)$$

$$V_b = \frac{D_{Port} \times W_b}{G_b} \quad (4.9)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (4.10)$$

$$V.M.A = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (4.11)$$

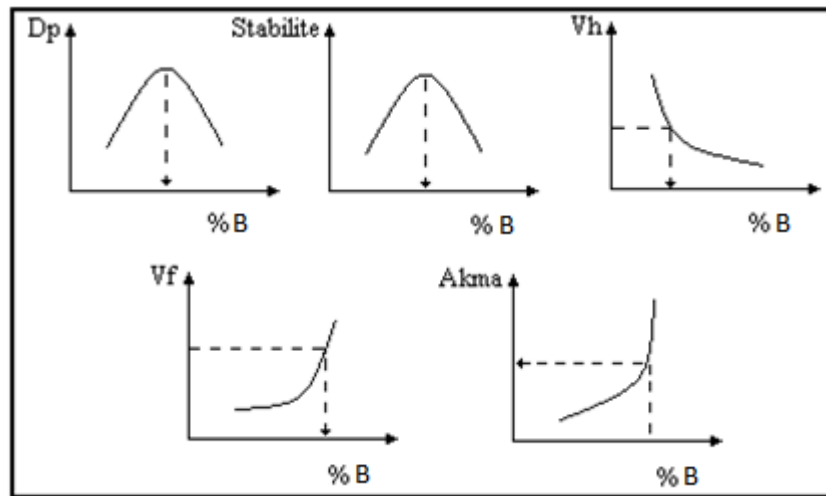
$$V_f = \frac{V_b}{V.M.A} \times 100 \quad (4.12)$$

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune  $60 \pm 1$  °C suda 30 – 40 dakika bekletilir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilir, akma çubuğu sabitlenir ve yükleme yapılır (Şekil 4.4). Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşılmıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir. Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63.5 mm.dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir. Marshall stabilitesi düzeltme katsayıları Ek-3'de verilmiştir. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin düzeltilmiş stabilite değerleri arasındaki farkın 120 kgf'den az olması durumunda üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarında 60 kgf'den daha az fark olan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak kabul alınır. Bu da sağlanmadığı takdirde deney yenilenir.



Şekil 4.4. Marshall stabilite ve akma aleti.

En az beş ayrı bitüm içeriğinde ve üçer tane hazırlanan numunelerin; pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ) - % B, stabilite - % B, boşluk oranı ( $V_h$ ) - % B, bitümle dolu boşluk oranı ( $V_f$ ) - % B grafikleri çizilir (Çizelge 4.5).  $D_p$  - % B ve stabilite - % B grafiklerinin maksimum olduğu bitüm içerikleri,  $V_h$  - % B grafiğinden boşluk oranının % 4'e tekabül ettiği bitüm içeriği ve  $V_f$  - % B grafiğinden bitümle dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği bitüm içeriği toplanarak aritmetik ortalaması alınır. Bu değer optimum bitüm içeriğini vermektedir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan üç numune denenerek bütün grafiklere uygun olup olmadığı kontrol edilir. Ayrıca kontrol numunelerinin akma değerlerinin standarda uygun olup olmadığı akma - % B grafiğinde kontrol edilir (Asfalt El Kitabı, 2002).



Çizelge 4.1. Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri.

#### 4.2.2. Nem hasarına karşı direnç 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 amacı ile 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 (Bagampadde, U., 2005; Zaniewski, J. et al., 2006).

Sıkıştırılmış BSK numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki gruba ayrılmakta ve bu iki grup numune dolaylı çekme deneyine tabi tutularak karışımın dayanım kaybı belirlenmektedir. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının sebebi, sıcak karışım aşınma tabakalarının 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 (Balta, İ., 2004).

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 60 °C’deki fırına yerleştirilip 2 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 doymun hale gelmesi sağlanır. Doymun hale getirilen numuneler en az 15 saat süreyle -18 °C’deki buzluğa yerleştirilir. Buzluktan çıkarılan numuneler 60 °C’deki su banyosunda 24 saat bekletilir. Daha sonra 25 °C’deki su banyosuna yerleştirilerek

2 saat bekletilir ve dolaylı çekme deneyine tabi tutulur (Lavin, P.G., 2003; Zaniwski, J. et al., 2006). Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ( $ITS_{yaş}$ ), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine ( $ITS_{kuru}$ ) oranı aşağıdaki (2.11) bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Lavin, P.G., 2003; Zaniwski, J. et al., 2006).

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (4.13)$$

$ITSR$ : 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 (Lavin, P.G., 2003; The Asphalt Institute, 1996). Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması yeterli görülmektedir. 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 (Lavin, P.G., 2003; Zaniwski, J. et al., 2006).

## **5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **5.1 Malzeme Özelliklerini Belirlemek Amacıyla Yapılan Deneyler**

BSK yapımında kullanılan malzemelerin özellikleri karışıma doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle kullanılacak malzemelerin şartname limitlerine uygunluğunun araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada agrega üzerinde elek analizi yapılarak gradasyon ayarlanmış, karışım hesabında kullanılacak olan agrega özgül ağırlıkları bulunmuştur. Bağlayıcılar üzerinde ise penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve depolama stabilitesi gibi geleneksel deneyler, ayrıca Superpave şartnamelerine uygun olarak kısa süreli yaşlandırma (RTFOT), dinamik kayma reometresi (DSR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri yapılmıştır.

#### **5.1.1 Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi**

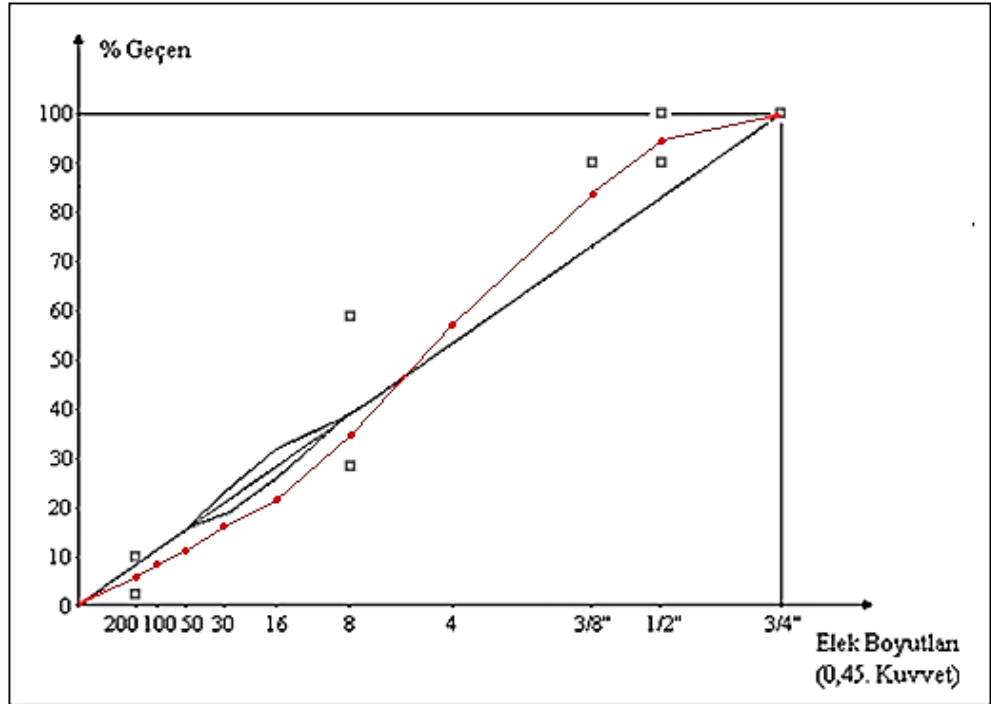
Bu çalışmada mineral agrega olarak, İzmir çevresindeki Ege Asfalt Şantiyesi'nden temin edilen kalker kullanılmıştır.

#### **5.1.2 Agrega gradasyonunun belirlenmesi**

Bu çalışmada Superpave yöntemine göre nominal maksimum elek boyutu 9,5 mm. olan gradasyona uygun bir gradasyon üzerinde çalışılmıştır. Şantiyeden kaba, ince ve mineral filler olmak üzere üç ayrı gruptan temin edilen agregalar laboratuarda elek analizi yapılarak on gruba ayrılmıştır. Kullanılan gradasyon Tablo 5.1'de ve grafik olarak Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** Kullanılan agrega gradasyonu.

Elek No	Elekten Geçen, (%)	Elekte Kalan, (%)	Elekte Kalan, (gr)	Toplam Elekte Kalan, (gr)
19 mm (3/4")	100	0	0	0
12,5 mm (1/2")	94	6	72	72
9,5 mm (3/8")	84	16	120	192
No: 4	58	42	312	504
No: 8	35	65	276	780
No: 16	22	78	156	936
No: 30	16	84	72	1008
No: 50	12	88	48	1056
No: 100	8	92	48	1104
No: 200	5	95	36	1140
Filler	-	-	60	1200

**Çizelge 5.1.** Kullanılan agrega gradasyon grafiği.

### 5.1.3 Agregaların özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Formül 3.1 kullanılarak kaba agreganın özgül ağırlığı, ince agreganın özgül ağırlığı Formül 3.3, fillerin ise Formül 3.5 yardımıyla bulunmuş ve agregaların fiziksel özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Kullanılan agregaların genel özellikleri.

Fiziksel Özellik	Agrega Boyutu		
	Kaba	İnce	Filler
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	2,637	-	-
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	-	2,472	-
Özgül Ağırlık, gr / cm <sup>3</sup>	-	-	2,739

### 5.1.4 Bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler

İzmir Pınarbaşı yöresinde faaliyet gösteren Ege Asfalt Ltd. Şti. firmasından temin edilen B 160/220 sınıfına ait bitüm, bu tez çalışması boyunca bağlayıcı malzemesi olarak kullanılmıştır. Saf B 160/220 bitüm ve bu bitüme %3, %4, %5 ve %6 oranlarında FT-parafin, Polietilen Mum ve Microwax ilave edilerek elde edilen karışımlar üzerinde bağlayıcı deneyleri yapılmıştır.

### 5.1.5 Katkı maddelerinin seçimi

Çalışmada, katkı maddesi olarak FT-parafin, Polietilen mumu ve Microwax seçilmiştir. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda katkı maddesi olarak kullanılan FT-parafin, Polietilen mumu ve Microwax, Öztin Kimya Sanayi ve Ticaret LTD’den temin edilmiştir. Bu mumların fiziksel özellikleri Tablo 5.3’te verilmiştir.

**Tablo 5.3.** Ticari mumların fiziksel özellikleri.

Deney Adı	Standartlar	Şartname	Sonuç
<b>FT-Parafin (Sasobit Plus)</b>			
Erime noktası, (°C)	ASTM D 983	100 – 106°C	102.5°C
Penetrasyon, (65°C'de)	ASTM D 1321	0 -12 dmm	6 dmm
Brookfield Viskozitesi, (135°C'de)	-	10 – 20 cP	17.21 cP
<b>Polietilen Mum (PE-WAX MP110)</b>			
Erime noktası, (°C)	ASTM D-3418	95 -105	95 - 103
Brookfield viskozitesi, (130°C'de)	DIN 53018	50 ± 25	36
Özgül ağırlık, (20°C'de)	ISO R 60	480 -520	516
Asitlik değeri, (mgKOH/gr)	ASTM D-1386 ISO 2114	0	0
<b>Microwax Mumu (Öztin Microwax)</b>			
Erime noktası, (°C)	ASTM D 983	-	64 - 66
Penetrasyon, (65°C'de)	ASTM D 1321	-	28 - 34
Yağ yüzdesi	ASTM D-721	% 2.5 maks.	-

Bu mumların resimleri sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

**Şekil 5.1.** FT-parafin mumu.

FT-parafin (Şekil 5.1) (Fischer Trops kökenli) gibi ticari mum türleri bitüm veya BSK'ya ilave edilerek kullanılmaktadır. Bu ürünler, bağlayıcının akışkanlığı arttırdıklarından dolayı BSK'ların karıştırma sıcaklığını düşürmek

amacıyla kullanılmakta, bu sayede enerji sarfiyatı ve dolayısıyla meydana gelen çevre kirliliği azaltabilmektedir. Ayrıca, viskozitenin düşmesiyle birlikte uygulama sırasında işlenebilirlik artmaktadır (Redelius, 2004).



Şekil 5.2. Polietilen mumu.

Polietilen mum (Şekil 5.2), etilenin en yüksek ya da düşük basınçlı katalitik polimerizasyonu ile ayrılmış sentetik mum türüdür. Ürünün çeşitli ergime derecesi ve yoğunluğu söz konusudur. Etilen, doğal gaz ya da çözülmüş petrol naftalinden elde edilir. Yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) ergime sıcaklığı 85-141 °C arasındadır. Düşük yoğunluklu polietilenin ergime sıcaklığı ise 30-141 °C arasında değişmektedir. Polietilenin penetrasyon test sonuçlarında özelliğine bağlı olarak farklı değerler ortaya çıkmakta ve bu değer 7-12 dmm arasında değişmektedir. Mumun yüzey üzerinde sağlamlaştırıcı ve aşınma önleyici pozitif etkileri vardır (Wilhelm, R. vd., 2005; Dadant ve oğulları, 1975).



Şekil 5.3. Microwax mumu.

Bu çalışmada kullanılan Microwax mumu (Şekil 5.3) mikrokristal yapılıdır. Mikrokristal mum (parafin) ham yağ tanklarının dip kısmında kalan petrol yağ buharından kalan doymuş hidrokarbon bölümünden oluşur. Mikrokristal mumun kristal yapısı diğer mumlara göre çok daha küçüktür ve nem, alkol, asit gibi maddelere karşı yüksek geçirmezlik özelliği gösterir. Mikrokristal mum sert bir yapıya sahiptir. 25 °C'de 11 dmm.'den daha düşük penetrasyon verebilmekte ve 60-93 °C ergime sıcaklığına sahiptir.

### 5.1.6 Modifiye işleminin gerçekleştirilmesi

Ylva Edwards ve arkadaşlarının farklı mumlar üzerinde yaptıkları çeşitli çalışmalar baz alınarak modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf B 160/220 bitümü 155 – 165 °C sıcaklıkta ısıtılmış ve çapı 9.5 cm olan bir silindirik kaba aktarılmıştır. Kap önceden 165 °C'ye ayarlanan ısıtıcıya yerleştirilmiş ve 15 dakika 360 devir/dakika hızda 15 dakika da 500 devir/dakika hızda toplam yarım saat karıştırılmıştır. Bitüm numunesinin ağırlığına göre katkı maddelerin gramajı belirtilmiş ve mikser döndürülmeye başlandıktan sonra belli oranlarda (%3, %4, %5 ve %6) ilave edilmiştir. Böylece FT-parafin, Polietilen mumu ve Microwax katkılı modifiye bitümleri hazırlandıktan sonra elde edilen bağlayıcılar BSK'lar ve bağlayıcı üzerinde yapılacak deneyler için ayrı cam kaplara depolanmıştır. Şekil 5.4'te mikser ve onun özel ısıtıcı aleti gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.4. Mikser (a), onun özel ısıtıcı aleti (b) ve kap (c) gösterilmiştir.

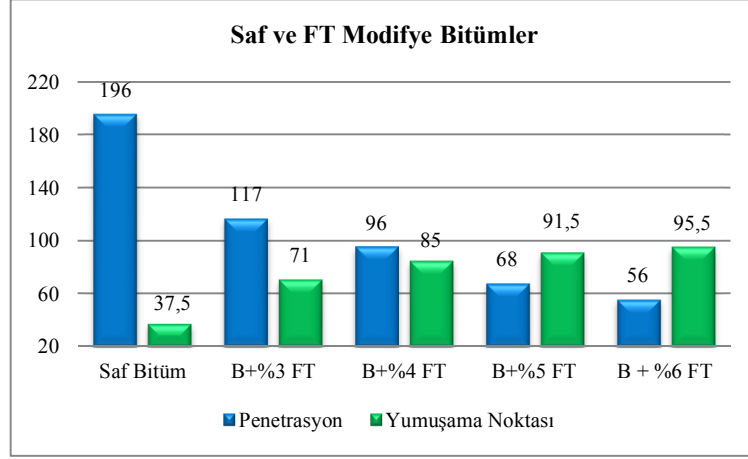
### 5.1.7 Saf ve modifiye karışımlar üzerinde yapılan geleneksel deneyler

Elde edilen modifiye ve saf bitümlerin üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası ve hazırlanacak olan BSK'lar için seçilen oranlardaki karışımların özgül ağırlıkları bulunmuştur. Saptanan penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak Penetrasyon indeksi (Pfeiffer ve Van Doormal formülü yardımıyla) belirlenmiştir. Sözü geçen deneylerin sonuçları Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

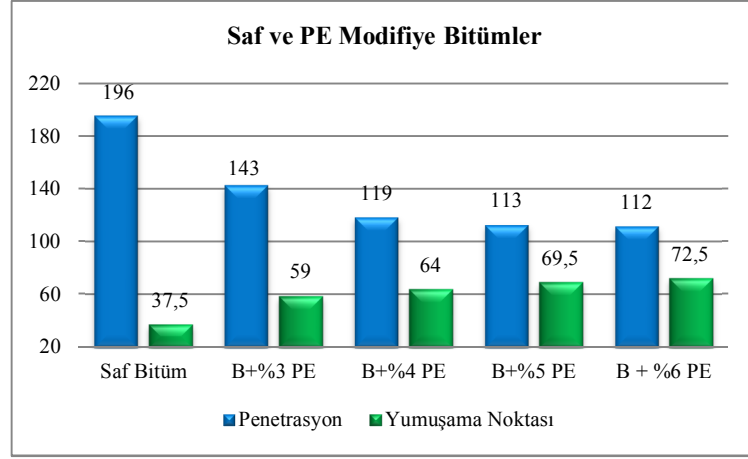
**Tablo 5.4.** Saf ve katkılı modifiye bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Penetrasyon, (25 °C'de)	Yumuşama Noktası, (°C)	Özgül Ağırlık, (25 °C'de)	Penetrasyon İndeksi
Deney Standardı	EN 1426 (TS 118)	EN 1427 (TS 120)	ASTM D 70 - 03	
Saf Bitüm, B 160/220	196	37.5	1,01603	-1,3
<b>FT-parafin (Sasobit)</b>				
B+%3 FT	117	71	-	5,73
B+%4 FT	96	85	1,01389	6,98
B+%5 FT	68	91.5	-	6,63
B+%6 FT	56	95.5	1,01535	6,5
<b>Polietilen mum (PE)</b>				
B+%3 PE	143	59	-	4,29
B+%4 PE	119	64	1,01584	4,56
B+%5 PE	113	69,5	-	5,35
B+%6 PE	112	72,5	1,0123	5,81
<b>Microwax (MW)</b>				
B+%3 MW	198	40.25	-	0,03
B+%4 MW	198	41.5	-	0,56
B+%5 MW	196	44.75	-	1,78
B+%6 MW	200	42.25	-	1,04

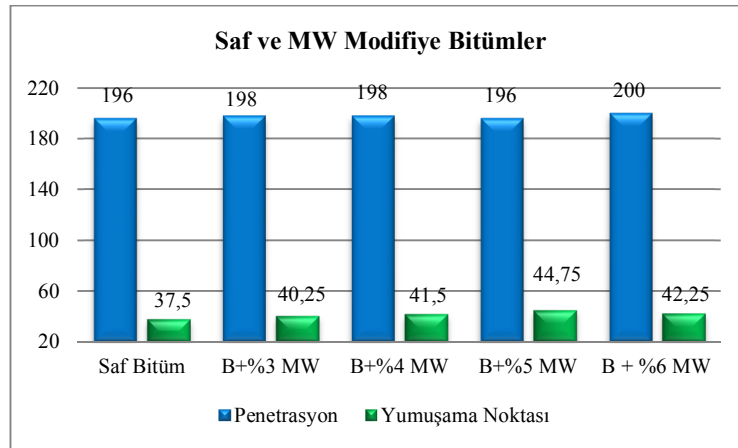
Tablo 5.4'teki saptanan sonuçları karşılaştırmak amacıyla Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 hazırlanmıştır.



**Çizelge 5.2.** Saf ve FT modifiyeli bitümlerinin penetrasyon (dmm) ve yumuşama noktası (C°) sonuçları.



**Çizelge 5.3.** Saf ve PE modifiyeli bitümlerinin penetrasyon (dmm) ve yumuşama noktası (C°) sonuçları.



**Çizelge 5.4.** Saf ve MW modifiyeli bitümlerinin penetrasyon (dmm) ve yumuşama noktası (C°) sonuçları.

Tablo 5.4 incelendiğinde elde edilen B+%6FT karışımı penetrasyonu 160/220 olan bitümün penetrasyonunu B 50/70'e düşürdüğü ve 37,5 °C olan yumuşama noktasını da 95,5 °C'ye yükselterek tüm katkıları içerisinde en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Ancak, penetrasyon indeksine bakıldığında (+6,5) düşük sıcaklığa karşı duyarlılığın belirgin bir ölçüde yükseldiği görülmüştür. Dolayısıyla, bu bağlayıcı türünün soğuk bölgelerde kullanılması uygun değildir.

PE katkılı bitümlerde yüzde arttıkça penetrasyonun düştüğü ve yumuşama noktasının yükseldiği görülmüştür. Ancak, %5'ten sonra penetrasyon değerlerinin hemen hemen hiç değişmediği görülmektedir (113'ten 112'ye kadar düşmüş). Yumuşama noktasını değerleri incelendiğinde, saf bitümün 37,5 °C olan yumuşama noktası değeri PE katkısıyla 72,5 °C'ye (B+%6PE) kadar yükselmektedir.

MW katkılı bağlayıcıların penetrasyonlarında katkı miktarının artmasıyla birlikte belirgin bir değişiklik gözlemlenmiştir. Ancak, yumuşama noktası değerlerinin B+%5MW bağlayıcıda 7,25 °C, B+%6MW katkılı bağlayıcıda ise 4,75 °C mertebesinde yükseldiği saptanmıştır. Penetrasyon değerlerinde artış gözlemlenmemesine rağmen, yumuşama noktalarında meydana gelen hafif artışlardan dolayı bu bağlayıcıların penetrasyon indekslerinde de az miktarda artış tespit edilmiştir.

### 5.1.8 Depolama stabilitesi deneyi

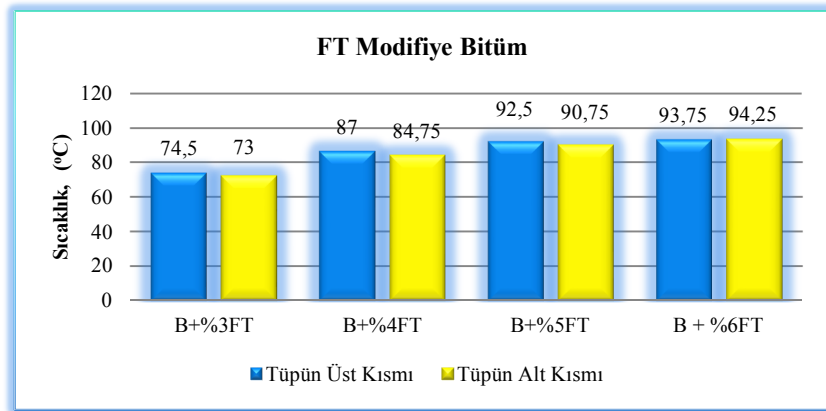
Depolama stabilitesi için hazırlanan üç parçalı cam tüp 300 °C'ye kadar dayanıklı silikonla birleştirilmiştir. Deneye tabi tutulacak numuneler 90 dakika boyunca 145 °C sıcaklıkta ısıtılmış ve cam çubukla aralıklı olarak karıştırılmak suretiyle bağlayıcının homojen yapısı korunmuştur. Bağlayıcı, hava kabarcığı oluşmayacak şekilde tüpün 150 mm yükseklik olarak belirlenen çizgisine kadar doldurulmuş ve bağlayıcının okside olmasını önlemek için sıkıca kapatılmıştır. Depolama stabilitesi tüpleri doldurulduktan sonra önceden ısıtılmış etüve dikey konumunda yerleştirilmiştir. Böylece tüpün, 180 °C ± 1 °C'de 72 saat süresince fırında kalması sağlanmıştır. Deney süresi dolduktan sonra tüp etüvden çıkartılmış ve oda sıcaklığına gelinceye kadar bırakılmıştır. Bu işlemin ardından maket bıçağı yardımıyla depolama stabilitesi tüpü düzgün bir şekilde 3 parçaya kesilmiştir.

Tüplerin üst ve alt kısımları ampirik deneylere tabi tutulmak üzere 145 °C'de ısıtılarak ayrı kaplara aktarılmıştır.

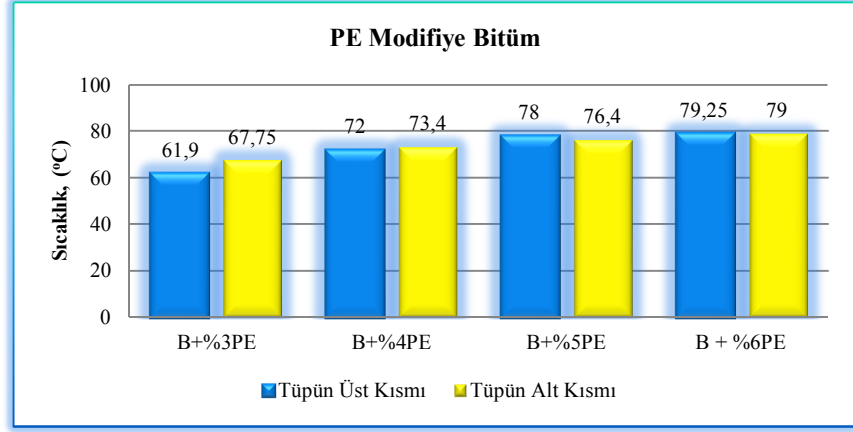
Depolama stabilitesi deneyi sonrasında FT-parafın, Polietilen mum ve Microwax ile modifiye edilen bitümün yüksek sıcaklıktaki depolama stabilitesi ve fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te verilmiştir. Depolama stabilitesi tüplerinin üst ve alt kısımlarına ait yumuşama noktası değerleri arasındaki ilişki Çizelge 5.5, 5.6, ve 5,7'de ve penetrasyon değerleri arasındaki ilişki ise Çizelge 5.8, 5.9, ve 5,10'da verilmiştir.

**Tablo 5.5.** Depolama stabilitesi deney sonuçları.

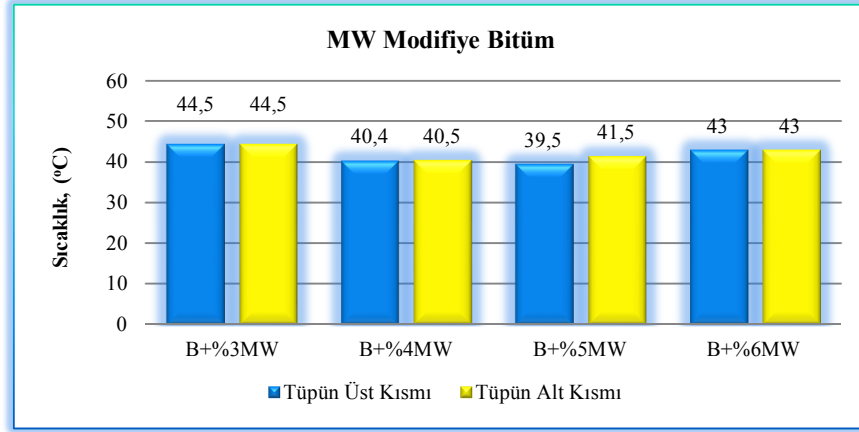
Bitüm Türü	Penetrasyon (25 °C'de)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Aral. Fark, (°C)
	Tüpün üst kısmı	Tüpün alt kısmı		Maks. 12 dmm	Tüpün üst kısmı	
<b>B + FT</b>						
B+%3FT	79	84	<b>5</b>	74.5	73	<b>1.5</b>
B+%4FT	76	69	<b>7</b>	87	84.75	<b>2.25</b>
B+%5FT	66	63	<b>3</b>	92.5	90.75	<b>1.75</b>
B+%6FT	54	51	<b>3</b>	93.75	94.25	<b>0.5</b>
<b>B + PE</b>						
B+%3PE	130	142	<b>12</b>	61.9	67.75	<b>5.85</b>
B+%4PE	106	118	<b>12</b>	72	73.4	<b>1.4</b>
B+%5PE	100	112	<b>12</b>	78	76.4	<b>1.6</b>
B+%6PE	99	111	<b>12</b>	79.25	79	<b>0.25</b>
<b>B + MW</b>						
B+%3MW	177	198	<b>21</b>	44.5	44.5	<b>0</b>
B+%4MW	191	199	<b>8</b>	40.4	40.5	<b>0.1</b>
B+%5MW	175	180	<b>5</b>	39.5	41.5	<b>2</b>
B+%6MW	138	171	<b>33</b>	43	43	<b>0</b>



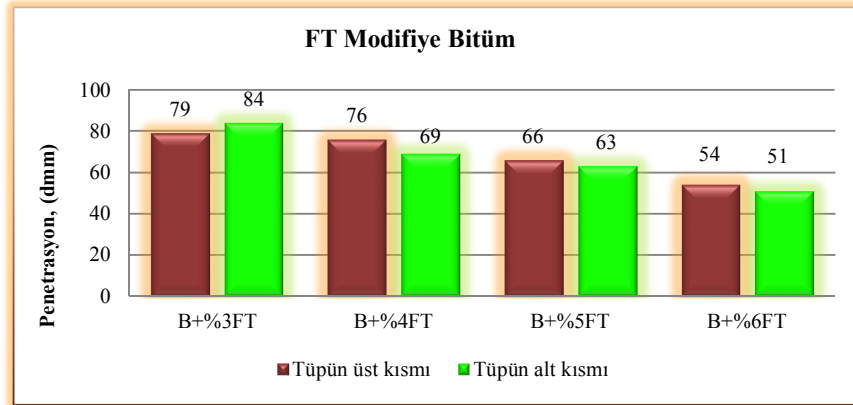
**Çizelge 5.5.** FT modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı.



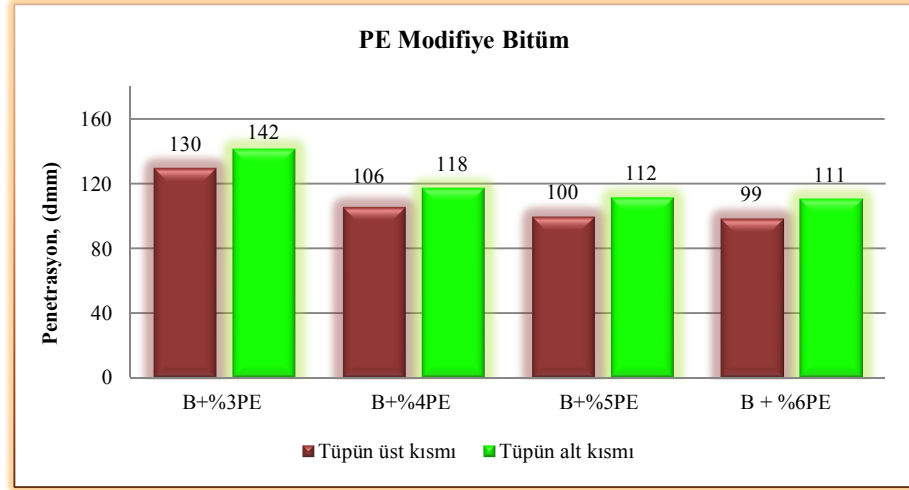
**Çizelge 5.6.** PE modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı.



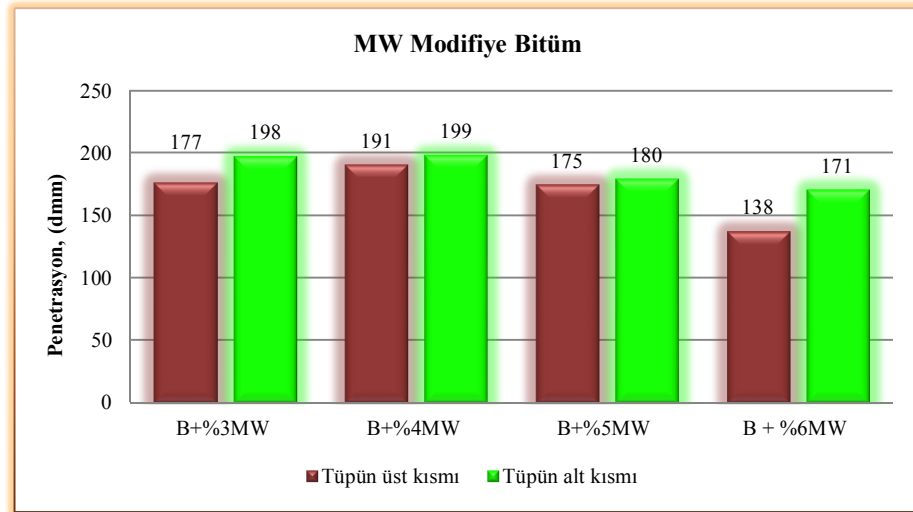
**Çizelge 5.7.** MW modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların yumuşama noktalarının arasındaki farkı.



**Çizelge 5.8.** FT, PE ve MW modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı.



**Çizelge 5.9.** PE modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı.



**Çizelge 5.10.** MW modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyinin sonucunda üst ve alt tüplerindeki bağlayıcıların penetrasyonlarının arasındaki farkı.

Depolama stabilitesi deneyinin yumuşama noktalarının sonuçları incelendiğinde B+%3PE kodlu bağlayıcının dışında tüm modifiye bitümlerin beklenen şartname değerlerini sağladığı, buna göre depolama stabilitesi deneyi sonrasında ortaya çıkan yumuşama noktası farkının 5 °C'nin altında olduğu saptanmıştır. Tüpün alt ve üst kısımlarındaki bitümlerin penetrasyon sonuçları değerlendirildiğinde B+%3MW ve B+%6MW hariç tüm bağlayıcılar şartname limiti olan 12 dmm'yi sağladığı görülmüştür. Bu sonuç, katkı olarak kullanılan

ticari mumların bitümlerle genel olarak iyi bir karışım oluşturdukları ve depolanmaya uygun olduklarını ortaya koymaktadır.

### 5.1.9 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)

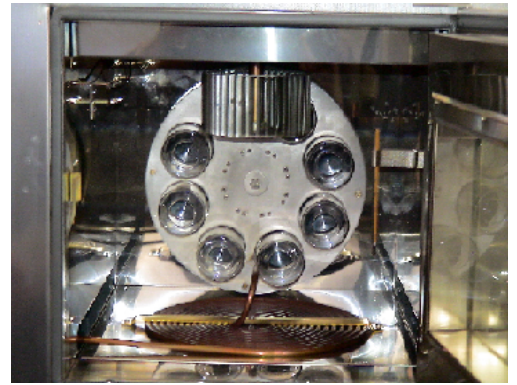
Saf ve modifiye bağlayıcıların karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla bağlayıcılar, Şekil 5.5'te görülen Dönel İnce Film Etüvü Deney (RTFOT) cihazı kullanılarak yaşlandırılmıştır.

Saf ve modifiye bağlayıcılar ayrı ayrı 140 – 150 °C sıcaklıkta ısıtılarak, 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış 35±0,5 gram bitümlü bağlayıcı RTFO şişelerine doldurulmuştur. 163 °C'ye kadar ısıtılmış RTFO'nun dönen tablası üzerine yerleştirilmiş ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülerek deney yapılmıştır (Şekil 5.6).

Deney sonucunda, şişelerdeki numunelerin bir kısmı bağlayıcıların kütle kaybının tespiti için kullanılmış, diğerleri ise performans testleri için ayrı bir kaba boşaltılarak saklanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.5. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) aleti (a) ve şişelerin yerleştirilmesi (b).



Şekil 5.6. RTFOT Deneyi yapılışı (a) ve şişelerin deneyden önceki ve sonraki görünüşü (b).

Saf ve FT, PE, MW modifiyeli bağlayıcıların RTFO deney sonrası kütle kayıpları sırasıyla Tablo 5.6, Tablo 5.7, Tablo 5.6’da, bu bağlayıcılarda, katkı oranı değişimi ile kütle kaybı arasındaki ilişki ise Çizelge 5.11, 5,12 ve 5,13’de gösterilmiştir.

Numune kütleindeki yüzdece değişim aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{[\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}]}{\text{İlk Kütle}} \times 100 \quad (5.1)$$

Tablo 5.6. FT modifiye bitüme ait RTFO sonuçları.

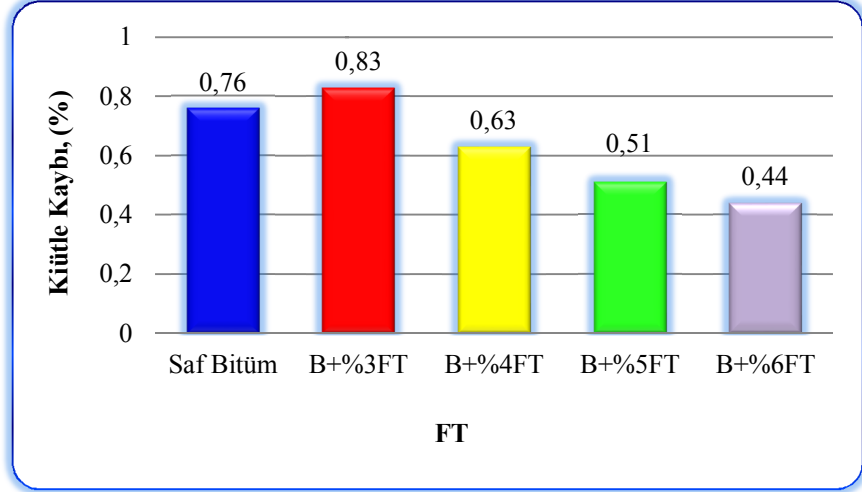
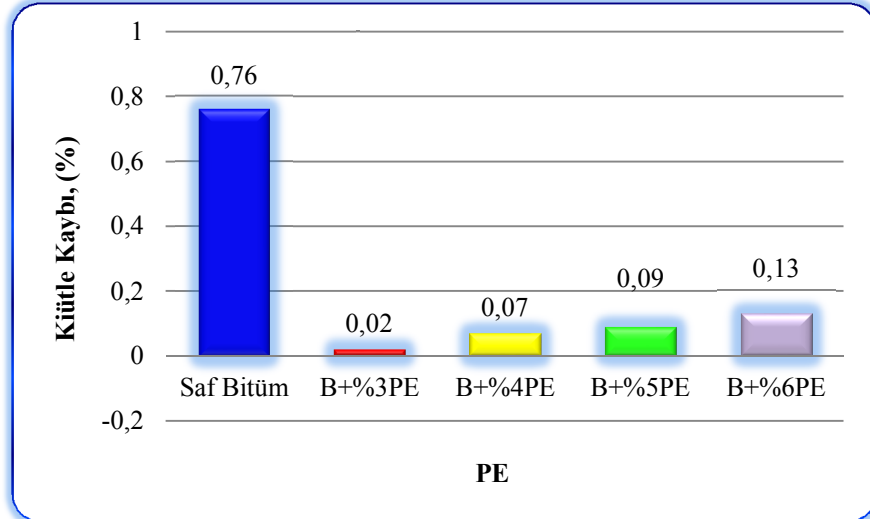
Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	B+FT			
			%3	%4	%5	%6
İlk Kütle. M1 (gr)	maks. 1.0	35,08	35,00	35,11	35,05	35,06
Son Kütle. M2 (gr)		34,81	34,71	34,89	34,87	34,91
Kütle Kaybı (%)= $100(M1 - M2) / M1$		0,76	0,83	0,63	0,51	0,44

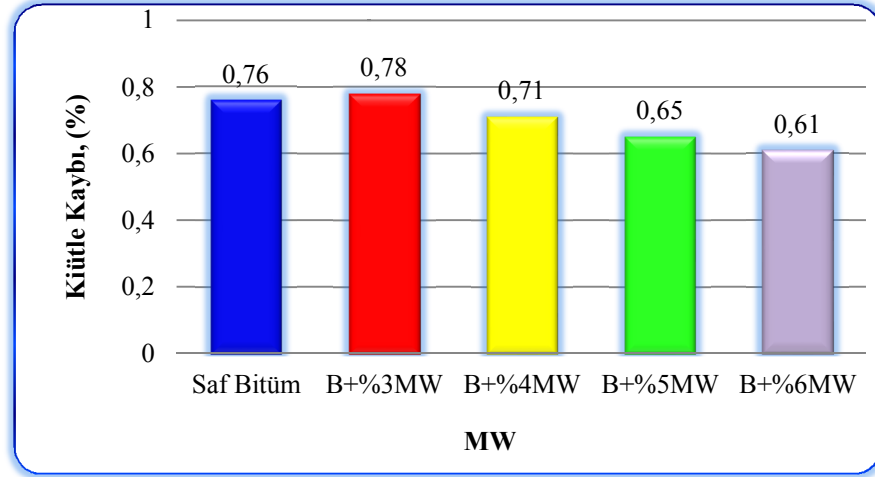
Tablo 5.7. PE modifiye bitüme ait RTFO sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	B+PE			
			%3	%4	%5	%6
İlk Kütle. M1 (gr)	maks. 1.0	35,08	34,93	35,04	34,93	35,455
Son Kütle. M2 (gr)		34,81	34,925	35,015	34,9	35,41
Kütle Kaybı (%)= $100(M1 - M2) / M1$		0,76	0,02	0,07	0,09	0,13

**Tablo 5.8.** MW modifiye bitüme ait RTFO sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	B+MW			
			%3	%4	%5	%6
İlk Kütle. M1 (gr)	maks. 1.0	35,08	34.89	35.03	35.11	35.17
Son Kütle. M2 (gr)		34,81	34.62	34.78	34.88	34.96
Kütle Kaybı (%)= $100(M1 - M2) / M1$		0,76	0.78	0.71	0.65	0.61

**Çizelge 5.11.** Yaşlanmanın etkisiyle FT katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı.**Çizelge 5.12.** Yaşlanmanın etkisiyle PE katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı.



Çizelge 5.13. Yaşlanmanın etkisiyle MW katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı.

RTFO deneyinden sonra bağlayıcıların fiziksel özellikleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmış ve sonuçları Tablo 5.9’da verilmiştir. Bağlayıcıların penetrasyonlarında farkların grafiksel değerlendirilmesi sırasıyla Çizelge 5.14, 5.15 ve 5.16’da ve yumuşama noktalarındaki farkların grafiksel değerlendirilmesi ise sırasıyla Çizelge 5.17, 5.18 ve 5.19’da gösterilmiştir.

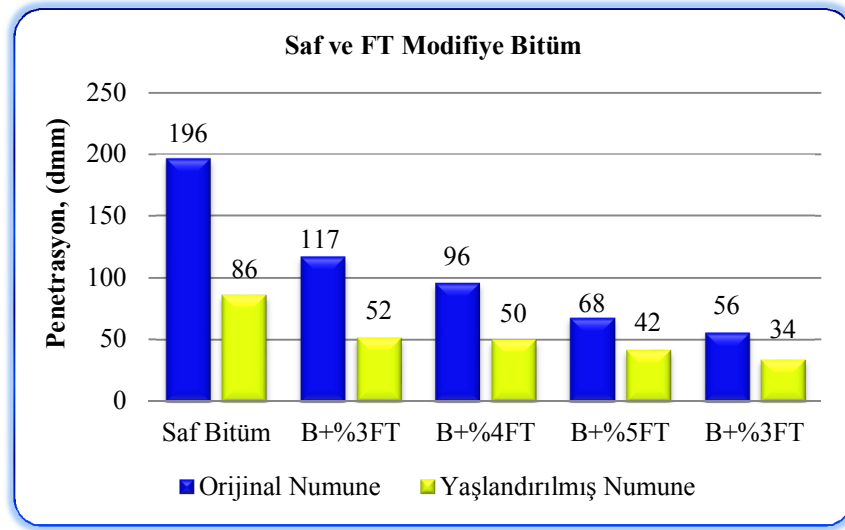
$$\text{Kalan iğne batma derinliği yüzdesi, } 25 \text{ } ^\circ\text{C}'\text{de} = 100 \times (P_1 - P_2)/P_1 \quad (5.2)$$

$$\text{Halka ve bilye yumuşama noktasındaki artış} = T_2 - T_1 \text{ (} ^\circ\text{C)} \quad (5.3)$$

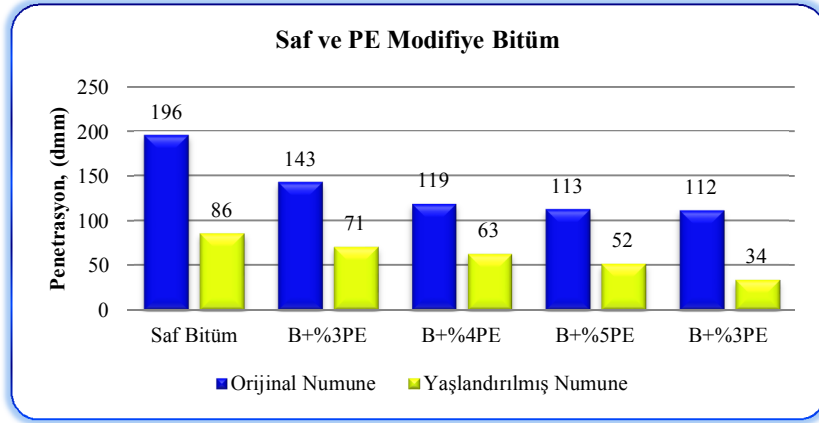
Tablo 5.9. Orijinal ve RTFO deneyine tabi tutulan bitümlerin penetrasyonları ve yumuşama noktaları.

Numune	Penetrasyon (25 °C’de)			Yumuşama noktası (°C)		
	Orijinal, P <sub>1</sub> dmm	RTFOT’dan sonra, P <sub>2</sub> dmm	Aradaki fark, dmm	Orijinal, T <sub>1</sub> (°C)	RTFOT’dan sonra, T <sub>2</sub> (°C)	Aradaki fark (°C)
Saf bitüm	196	86	56	37,5	41,5	-4
<b>B+FT</b>						
%3	117	52	56	71	79	-8
%4	96	50	48	85	90	-5
%5	68	42	38	91,5	93,25	-1,75
%6	56	34	39	95,5	96,7	-1,2

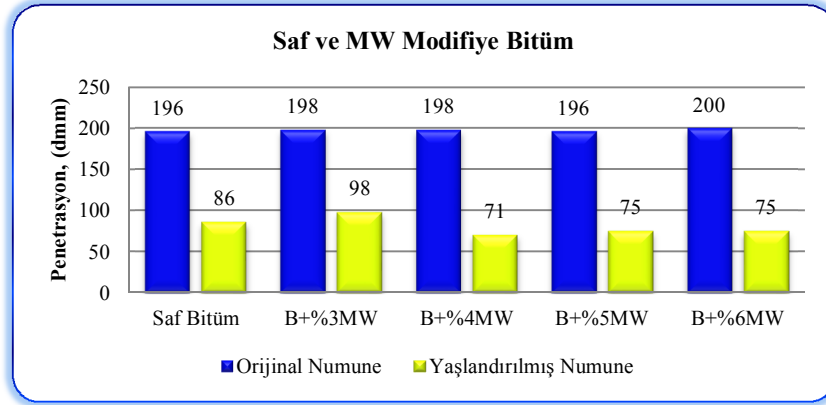
Numune	Penetrasyon (25 °C'de)	Yumuşama noktası (°C)	Numune Aradaki fark, dmm	Penetrasyon (25 °C'de)	Yumuşama noktası (°C)	Numune Aradaki fark (°C)
	Orijinal, P <sub>1</sub> dmm	RTFOT'dan sonra, P <sub>2</sub> dmm		Orijinal, T <sub>1</sub> (°C)	RTFOT'dan sonra, T <sub>2</sub> (°C)	
<b>B+PE</b>						
%3	143	71	<b>50</b>	59	49	<b>+10</b>
%4	119	63	<b>47</b>	64	56,9	<b>+7,1</b>
%5	113	52	<b>54</b>	69,5	60,8	<b>+8,7</b>
%6	112	54	<b>52</b>	72,5	67,9	<b>+4,6</b>
<b>B+MW</b>						
%3	198	98	<b>51</b>	40.25	46	<b>-5,75</b>
%4	198	71	<b>64</b>	41.5	44,5	<b>-3</b>
%5	196	75	<b>62</b>	44.75	46,2	<b>-1,45</b>
%6	200	75	<b>63</b>	42.25	45,4	<b>-3,15</b>



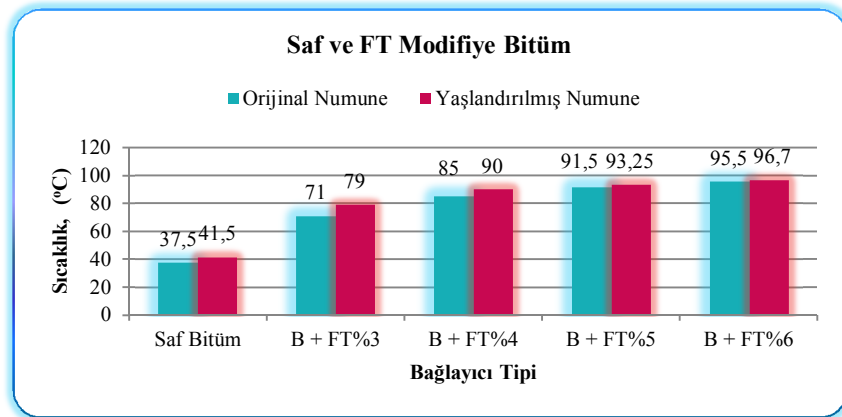
**Çizelge 5.14.** Yaşlanmanın etkisiyle FT katkıli bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.



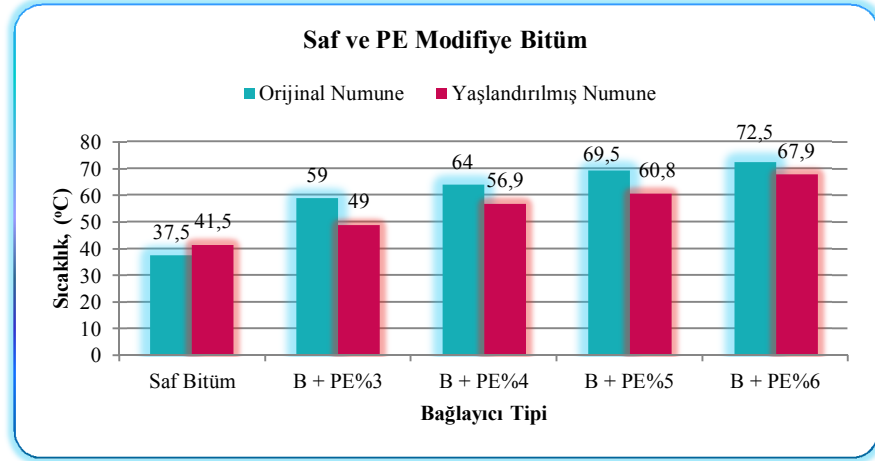
**Çizelge 5.15.** Yaşlanmanın etkisiyle PE katkıli bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.



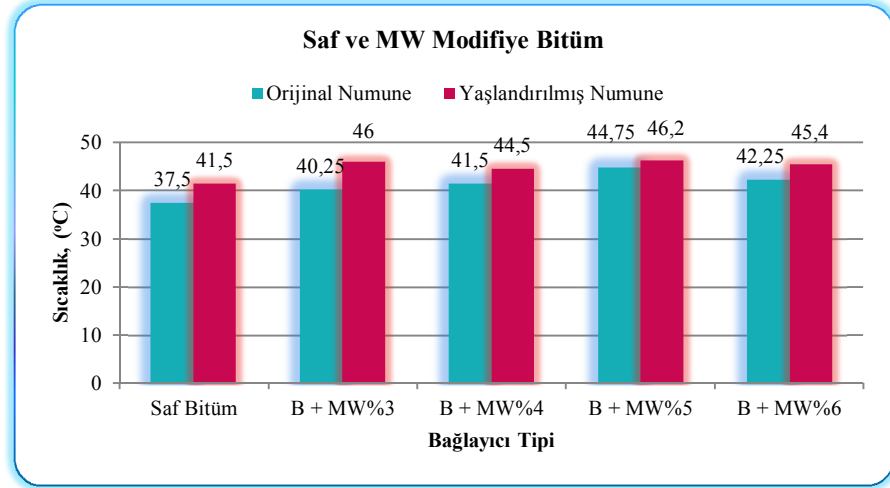
**Çizelge 5.16.** Yaşlanmanın etkisiyle MW katkıli bağlayıcılarda meydana gelen penetrasyon değişiklikleri.



**Çizelge 5.17.** Yaşlanmanın etkisiyle FT katkıli bağlayıcılarda meydana gelen yumuşama noktası değişiklikleri.



**Çizelge 5.18.** Yaşlanmanın etkisiyle PE katkılı bağlayıcılarda meydana gelen yumuşama noktası değişiklikleri.



**Çizelge 5.19.** Yaşlanmanın etkisiyle MW katkılı bağlayıcılarda meydana gelen yumuşama noktası değişiklikleri.

Tablo 5.4; 5.7 ve 5.8 incelendiğinde, her üç mum katkılı bağlayıcıların RTFO deneyi ile yaşlandırma sonuçları, tüm numunelerin şartname değerlerini sağladıkları görülmektedir. Ayrıca, PE katkılı numunelerin verdiği sonuçlar hariç diğer tüm katkılı bağlayıcıların katkı oranının artması ile kütle kaybının sürekli olarak azalmasını sağladığı görülmektedir. Bu bitüm içerisinde yüksek sıcaklık etkisi ile uçucu hale gelen aromatiklerin FT ve MW katkıları sayesinde daha az buharlaştığı anlamına gelmektedir. Bu sayede meydana gelen kayıplar azalmaktadır.

Deney sonuçları daha önceden orijinal bitümler üzerinde elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede bitümlerde kısa süreli yaşlanma sonrasında aşırı sertleşmelerin veya bozulmaların meydana gelip gelmediği tespit edilebilmektedir. Gerekli kıyaslamaların yapılması için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından verilen şartname limitleri kullanılmıştır. Buna göre, yaşlandırma sonrasındaki yumuşama noktasının kabul edilebilir değerleri orijinal numuneler üzerinde bulunan yumuşama noktası değerlerinin en fazla 5 °C altında veya 8 °C üzerinde, penetrasyon değerinin orijinal penetrasyon değerinin en az %40 civarında olması gerekmektedir. Bu şartlara göre, yaşlandırma işlemi sonrasında yumuşama noktasında meydana gelen değişiklikler incelendiğinde (Tablo 5.9), genel olarak bitüm numunelerinin standartları koruduğu görülmektedir. Katkı türlerinin bazı yüzdelerinde standartlar sağlanmasa da genel olarak diğer yüzdelerin şartname kriterlerine uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, FT, PE ve MW katkı türleri ile elde edilen bağlayıcılarda kısa süreli yaşlanma sonucunda aşırı sertleşmelerin meydana gelmeyeceğini ifade etmektedir. Benzer şekilde penetrasyon değerleri de incelendiğinde hemen hemen tüm katkı türlerinde yaşlandırma sonrasında en az %40'lik bir penetrasyon değerinin korunduğu tespit edilmiştir. Bu bitümün servis öncesi yaşlanmayı temsil eden kısa süreli yaşlanma nedeniyle çok katı kıvamlara ulaşmayacağını ortaya koymaktadır.

#### **5.1.10 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (TS EN 14770)**

Çalışmada saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki PG sınıfları DSR cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. DSR deneyleri, saf ve yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir.

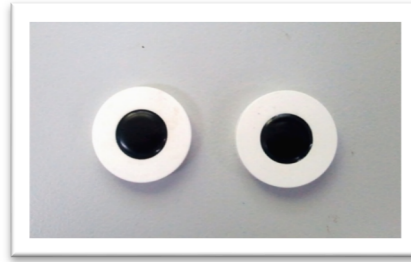
Kullanılan saf bitümün B 160/220 gibi yumuşak bir bağlayıcı olmasından ötürü deney başlangıç derecesi 46 °C olarak seçilmiştir. Deney esnasında bağlayıcının reolojik özellikleri olan kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) belirlenerek, bağlayıcının tekerlek izi parametresi ( $G^*/\sin \delta$ ) hesaplanmış, böylelikle bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği direnç tespit edilmiştir. Tekerlek izi parametreleri, şartname kriterleri ile kıyaslanmış ve

standartlara uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmada, Şekil 5.7’de görülen Anton Paar Smart Pave Plus 301 dinamik kayma reometresi kullanılmıştır.

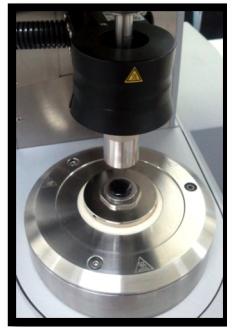
DSR deneyi için öncelikle, saf ve modifiye bağlayıcılar 140 °C’de ısıtılarak Şekil 5.8’de görüldüğü gibi silikon kalıba doldurulmuş ve soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler, deney sıcaklığına getirilmiş cihazın alt plakasına yerleştirilmiştir. Hareketli olan üst plaka ise yazılım sayesinde deney koşullarına uygun şekilde 1 mm’lik aralık bırakılacak şekilde ayarlanmaktadır. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılmıştır.



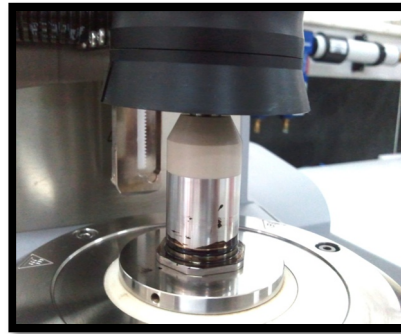
Şekil 5.7. Anton Paar Smart Pave Plus 301 dinamik kayma reometresinin genel görünüşü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.8. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a), alt plakaya yerleştirilmesi (b) ve üst plakanın deney konumuna getirilmesi (c).

Deneye hazır hale getirilen numune, PLT sistemi yardımıyla 0,01 °C hassasiyetle deney sıcaklığına (46 °C) getirilmiş ve ısı dengesinin sağlanması için 15 dakika bekletilmiştir. Bu süre sonunda bağlayıcı şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/s frekansta, yaşlandırılmamış (orijinal) numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmıştır. 10 devirlik hazırlıktan sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilmiştir. Reometre yazılımı tarafından, uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) değerleri otomatik olarak hesaplanmış ve ortalaması verilmiştir.

Çalışmada ikinci olarak, B-160/220 bağlayıcısı ve bunun farklı FT, PE ve MW (%3, %4, %5, %6) içeriğindeki modifiye bağlayıcıların, yüksek servis sıcaklığındaki reolojik özellikleri ( $G^*$ ,  $\delta$ ) belirlenmiş ve bağlayıcının “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği direnç tespit edilerek, şartname kriterleri (AASHTO MP1) ile kıyaslanmış ve bu bağlayıcıların yüksek servis sıcaklıklarındaki performans dereceleri belirlenmiştir. B 160/220 bağlayıcısı ve bunun farklı FT, PE ve MW (%3, %4, %5, %6) içerikli bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçları sırasıyla Tablo 5.8–5.20’de verilmiştir.

**Tablo 5.10.** Orijinal ve yaşlandırılmış saf bitüm numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	$G^*$ (kPa)	$\delta$ (o)	$G^*/\sin \delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
46 oC Orijinal	4,64	86,6	4,65	$\geq 1$	PG 52-Y
52 oC Orijinal	1,85	87,4	1,85		
58 oC Orijinal	0,766	88,2	0,767		
46 oC Yaşlandırılmış	-	-	-	$\geq 2,2$	PG 52-Y
52 oC Yaşlandırılmış	3,06	86,1	3,07		
58 oC Yaşlandırılmış	1,39	87,2	1,39		

Saf bitümün DSR sonuçları (Tablo 5.9 ve Çizelge 5.7) incelendiğinde saf bitümün (B-160/220)  $G^*/\sin \delta$  değerinin 52 °C’de 1,85 kPa olduğu, ancak 58 °C’de şartname limiti olan min. 1 kPa’ın altında kaldığı (0,767 kPa)

görülmüştür. RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı üzerinde yapılan DSR deneylerinde, 52 °C’de  $G^*/\sin \delta$  parametresi 3,17 kPa değerine sahipken, 58 °C’de 1,39 kPa ile şartname limiti olan min. 2,2 kPa değerinin altında kalmıştır. Dolayısıyla orijinal bitümün sınıfı PG 52-Y olarak belirlenmiştir.

**Tablo 5.11.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3FT numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	$G^*$ (kPa)	$\delta$ (o)	$G^*/\sin \delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	7,13	78,3	7,28	$\geq 1$	↑ PG 64-Y
58 oC Orijinal	3,44	79,5	3,50		
64 oC Orijinal	1,65	81,0	1,67		
70 oC Orijinal	0,85	81,7	0,86		
52oC Yaşlandırılmış	12,4	77,2	12,7	$\geq 2,2$	↑ PG 64-Y
58oC Yaşlandırılmış	5,43	79,0	5,53		
64 oC Orijinal	2,49	80,7	2,52		
70 oC Orijinal	1,26	81,9	1,27		

Not - ↑ bitümün PG’inde bir sınıf yükselmenin gözlemlenmesi.

**Tablo 5.12.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4FT numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	$G^*$ (kPa)	$\delta$ (o)	$G^*/\sin \delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	9,38	76,8	9,64	$\geq 1$	↑ PG70 -Y
58 oC Orijinal	4,39	78,5	4,48		
64 oC Orijinal	1,99	80,3	2,02		
70 oC Orijinal	1,00	81,2	1,01		
76 oC Orijinal	0,57	80,7	0,58		
52 oC Yaşlandırılmış	19,0	73,4	19,9	$\geq 2,2$	=
58 oC Yaşlandırılmış	8,27	74,7	8,58		
64 oC Orijinal	3,75	76,5	3,86		
70 oC Orijinal	1,94	77,4	1,99		

**Tablo 5.13.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5FT numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	9,69	76,6	9,96	$\geq 1$	PG 70-Y
58 oC Orijinal	4,46	78,8	4,55		
64 oC Orijinal	2,09	80,4	2,11		
70 oC Orijinal	1,12	80,2	1,14		
76 oC Orijinal	0,68	78,4	0,7		
52oC Yaşlandırılmış	23,8	72,6	25,0	$\geq 2,2$	PG 70-Y
58oC Yaşlandırılmış	10,7	74,0	11,2		
s64 oC Yaşlandırılmış	4,86	75,6	5,01		
70 oC Yaşlandırılmış	2,39	76,1	2,46		
76 oC Yaşlandırılmış	1,37	75,2	1,42		

Not -  $\equiv$  bitümün PG sınıfının bir önceki sınıfla aynı sınıfta kalması.

**Tablo 5.14.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6FT numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	17,8	73,7	18,5	$\geq 1$	PG 76-Y
58 oC Orijinal	8,42	75,3	8,70		
64 oC Orijinal	3,98	76,7	4,09		
70 oC Orijinal	2,05	76,9	2,11		
76 oC Orijinal	1,17	75,6	1,21		
82 oC Orijinal	0,73	73,0	0,76	$\geq 2,2$	PG 70-Y
52oC Yaşlandırılmış	39,0	70,8	41,3		
58oC Yaşlandırılmış	18,3	71,8	19,2		
64 oC Yaşlandırılmış	8,56	73,2	8,94		
70 oC Yaşlandırılmış	4,04	74,6	4,20		
76 oC Yaşlandırılmış	2,00	75,2	2,07		

B+FT (%3, %4, %5 ve %6) modifiye bitümlerin DSR sonuçları incelendiğinde B+%3FT bağlayıcısının orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin (Tablo 5.11) PG 52-Y'den (saf bitüme göre) PG 64-Y'e yükseldiği görülmektedir. Buna göre, B+%3FT bağlayıcısının saf bitüme göre yüksek sıcaklık sınıfının iki sınıf arttırması (12 °C), PG 52-Y olan saf bitüme göre sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düştüğü ve tekerlek izi dayanımının arttırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, orijinal bağlayıcının 68,7 °C sıcaklığa kadar yaşlandırılmış bitümün ise yaklaşık 65,2 °C sıcaklığa kadar şartname limitlerini sağladığı görülmektedir. Tablo 5.12 (B+%4FT) incelendiğinde orijinal bitümün bir sınıf daha atlattığı ancak yaşlandırılmış bitümün aynı sınıfta kaldığı görülmektedir. B+%4FT kodlu orijinal bağlayıcı 70,1 °C'de şartname limitlerine yenilirken, yaşlandırılmış B+%4FT bağlayıcısı şartname limitlerini 69,1 °C'de sağlayamamıştır. Böylelikle B+%4FT bağlayıcısının PG sınıfı 64-Y olarak bulunmuştur. Tablo 5.13 (B+%5FT) incelendiğinde bir orijinal bitümün sıcaklık şartname limitini 71,6 °C ile sağlayarak aynı sınıfta kaldığı, yaşlandırılmış bitümünse bir sınıf atlattığı görülmektedir. Buna göre, yaşlandırılmış bitüm sıcaklık şartname limitini 71,2 °C ile sağlayarak PG 70-Y sınıfına kadar yükselme göstermiştir. En yüksek katkı oranına sahip olan B + %6FT incelendiğinde (Tablo 5.14) orijinal bağlayıcının şartname limitlerine 78,5 °C'de yenildiği, yaşlandırılmış numunenin ise 75,5 °C'yi sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla, bu bağlayıcı türünün, bir sınıf daha atlatarak yüksek sıcaklık performans sınıfının PG 76-Y'e kadar yükseldiği görülmüştür. B+%6FT bağlayıcısının PG sınıfının yüksek olması, FT katkısıyla saf bitümün tekerlek izine karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.

Genel olarak, yumuşak bitümlere FT katkısının belli oranlarda ilave edilmesiyle bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığının azaldığı dolayısıyla da tekerlek izine karşı dayanıklılığın arttığı tespit edilmiştir.

**Tablo 5.15.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3PE numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	4,66	73,5	4,86	$\geq 1$	↑ PG 64-Y
58 oC Orijinal	2,47	72,3	2,60		
64 oC Orijinal	1,16	73,6	1,21		
70 oC Orijinal	0,54	74,7	0,56		
52oC Yaşlandırılmış	5,41	81,5	5,47	$\geq 2,2$	↑ PG 58-Y
58oC Yaşlandırılmış	2,25	83,4	2,27		
64 oC Yaşlandırılmış	0,937	85,2	0,94		

**Tablo 5.16.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4PE numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	4,09	77,2	4,19	$\geq 1$	↓ PG 58-Y
58 oC Orijinal	2,01	78,2	2,05		
64 oC Orijinal	0,90	80,4	0,91		
52oC Yaşlandırılmış	6,16	77,6	6,31	$\geq 2,2$	=
58oC Yaşlandırılmış	2,60	79,2	2,65		
64 oC Yaşlandırılmış	1,12	81,0	1,13		

Not - ↓ bitümün PG'sinde bir sınıf düşmenin gözlemlenmesi.

**Tablo 5.17.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5PE numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	7,27	69,5	7,76	$\geq 1$	↑ PG 64-Y
58 oC Orijinal	3,65	69,4	3,90		
64 oC Orijinal	1,65	71,1	1,75		
70 oC Orijinal	0,76	72,1	0,80		

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52oC Yaşlandırılmış	13,8	70,1	14,6	≥ 2,2	↑ PG 64-Y
58oC Yaşlandırılmış	6,12	69,4	6,54		
64 oC Yaşlandırılmış	2,80	69,4	2,99		
70 oC Yaşlandırılmış	1,24	70,8	1,31		

**Tablo 5.18.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6PE numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	7,66	66,9	8,33	≥ 1	PG 64-Y
58 oC Orijinal	3,91	66,0	4,28		
64 oC Orijinal	1,60	69,0	1,71		
70 oC Orijinal	0,86	74,7	0,89		
52oC Yaşlandırılmış	15,8	69,5	16,9	≥ 2,2	PG 64-Y
58oC Yaşlandırılmış	7,11	68,7	7,63		
64 oC Yaşlandırılmış	3,24	68,5	3,48		
70 oC Yaşlandırılmış	1,55	68,2	1,67		

Tablo 5.15 incelendiğinde, B+%3PE modifiye bağlayıcısının şartname limitlerini yaklaşık 65,5 °C sıcaklığa kadar sağladığı ve dolayısıyla bu bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının PG 64-Y olduğu görülmüştür. Aynı orandaki yaşlandırılmış bitümün bir sınıf atlatarak yüksek sıcaklık performansı PG 58-Y olduğu saptanmıştır. B 160/220 bağlayıcısına %4PE ilave edilmesiyle elde edilen modifiye bağlayıcının DSR deney sonuçları incelendiğinde (Tablo 5.16) B+%3PE bağlayıcısına göre tekerlek izi orijinal bitümde düşme yaşlandırılmış bitümde ise sınıfının değişmediği görülmüştür. Dolayısıyla hem orijinal hem de yaşlandırılmış B+%4PE bağlayıcısı PG 58-Y gibi sınıfı göstermiştir. B+%5PE modifiye bağlayıcısının DSR deney sonuçları (Tablo 5.17) incelendiğinde şartname limitlerinin yaklaşık 68,3 °C yüksek sıcaklığa kadar sağlandığı, tekerlek izi dayanımı ve sıcaklık hassasiyetinin B+%4PE bağlayıcısına göre arttığı ve modifiye bağlayıcı performans sınıfının PG 64-Y'ye yükseldiği

gözükmiştir. B+%6PE katkılı orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları değerlendirildiğinde (Tablo 5.18) orijinal bitüm şartname limitlerini 69 °C yaşlandırılmış bitümse yaklaşık 67,7 °C ile iki bağlayıcının da B+%5PE gibi PG 64-Y sınıfı sağladığı gözlemlenmiştir.

Modifiye bağlayıcılar kendi içinde değerlendirildiğinde, tüm katkı oranlarının içerisinde (%3, %4, %5 ve %6) en iyi sonucu B+%3PE vermiştir. Bu bağlayıcı diğer bağlayıcılara nazaran katkı malzemesinin oranı açısından en azı olmasına rağmen B+%6PE bağlayıcısına çok yakın sonucu vermiştir. Böylece B+%3PE bağlayıcısının hem tasarruflu hem de tekerlek izi parametresine karşı daha etkili olduğu saptanmıştır.

**Tablo 5.19.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%3MW numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	1,33	86,0	1,34	≥ 1	PG 52-Y
58 oC Orijinal	0,64	86,3	0,64		
52oC Yaşlandırılmış	2,59	85,5	2,59	≥ 2,2	PG 52-Y
58oC Yaşlandırılmış	1,12	86,6	1,12		

**Tablo 5.20.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%4MW numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	1,11	86,4	1,11	≥ 1	PG 52-Y
58 oC Orijinal	0,52	86,7	0,53		
52oC Yaşlandırılmış	3,55	85,3	3,56	≥ 2,2	PG 52-Y
58oC Yaşlandırılmış	0,91	87,1	0,92		

**Tablo 5.21.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%5MW numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
52 oC Orijinal	1,09	86,1	1,10	$\geq 1$	==== PG 52-Y
58 oC Orijinal	0,51	86,6	0,51		
46oC Yaşlandırılmış	4,94	83,4	4,97	$\geq 2,2$	↓ PG 46-Y
52oC Yaşlandırılmış	1,83	85,6	1,84		

**Tablo 5.22.** Orijinal ve yaşlandırılmış B+%6MW numunesinin DSR deney sonuçları.

Sıcaklık / Özellik	G* (kPa)	$\delta$ (o)	G*/sin $\delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa)	Sonuç (PG)
46 oC Orijinal	2,57	84,1	2,59	$\geq 1$	↓ PG 46-Y
52 oC Orijinal	0,95	86,0	0,95		
46oC Yaşlandırılmış	4,99	82,8	5,03	$\geq 2,2$	==== PG 46-Y
52oC Yaşlandırılmış	2,00	84,7	2,01		

DSR deney sonuçlarına göre; Tablo 5.19 incelendiğinde (B+%3MW) sıcaklık limitleri orijinal bitüm 54,3 °C, yaşlandırılmış bitüm ise 53,2 °C sıcaklığa kadar sağladığı ve dolayısıyla saf bitümle aynı sonucu (PG 52-Y) verdiği gözlemlenmiştir. B+%4MW bağlayıcının sonuçları değerlendirilirse (Tablo 5.20) sıcaklık limitleri orijinal 52,8 °C, yaşlandırılmış bitüm ise 54,2 °C sıcaklığa kadar sağlayarak gene PG 52-Y sınıfında kaldığı görülmektedir. Tablo 5.21 incelenecek olursa (B+%5MW) orijinal bağlayıcının tekerlek izi parametresinin 1,10 kPa değeri göstererek PG sınıfı 52-Y’te kaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış bitüm ise 52 °C’de tekerlek izi parametresi 1,84 kPa değeri göstererek saf bitümünkinden daha düşük yani PG 46-Y sınıfa geri düştüğü gözlemlenmektedir. Son olarak ta Tablo 5.22 değerlendirilecek olursa (B+%5MW) orijinal bitüm 52 °C’de tekerlek izi parametresi 0,95 kPa gibi düşük değeri göstererek PG sınıfı 46-Y olduğunu görebiliyoruz. Yaşlandırılmış bitümün ise B+%4MW gibi 52 °C’den geçmeden PG 46-Y sınıfında kaldığı görülmektedir.

Dört farklı yüzdeleri kendi aralarında karşılaştıracak olursak hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcıların hiç birinin sınıf atlatmadığı hatta katkı oranı yükseldikçe PG sınıfının düştüğü saptanmıştır. Böylesine bir sonuçtan MW katkısını ilave etmekle bağlayıcının yüksek sıcaklığa olan hassasiyeti arttığı anlaşılmaktadır.

Üç katkıyı (FT, PE ve MW) kendi aralarında karşılaştıracak olursak en iyi sonucu hem orijinal hem de yaşlandırılmış olan FT katkısının verdiği anlaşılmaktadır. Çünkü malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olan kayma modülü ( $G^*$ ) değerinin hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılarda FT katkı miktarının artmasıyla önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Özellikle B+%6FT bağlayıcısı PG 52-Y olan saf bitümü PG 76-Y sınıfına yükseltmiş ve aynı anda faz açısının ( $\delta$ )  $75,6^\circ$ 'ye kadar düşürdüğü görülmektedir.  $52^\circ\text{C}$ 'de faz açısı  $87,4^\circ$  olan saf bitümün faz açısının ( $\delta$ ) kısmen düştüğü yani bağlayıcının daha da viskoz hale geldiği ancak katkı miktarlarının artması ile birlikte faz açılarında düşüş meydana geldiği dolayısıyla modifiye bağlayıcıların FT miktarının artması ile birlikte daha elastik bir katı gibi davrandıkları görülmektedir.

### 5.1.11 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre deneyi, orijinal saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanan ve karışım tasarımında kullanılacak bu bağlayıcıların, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla çalışmada, B 160/220 bağlayıcısı ve bu bağlayıcıya belirli oranlarda ticari mumlar (FT, PE, MW) katılarak elde edilmiş olan B+FT (%3, %4, %5, %6), B+PE (%3, %4, %5, %6) ve B+MW (%3, %4, %5, %6) modifiye bağlayıcılarının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Çalışmada, bağlayıcıların  $135$  ve  $165$  °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri, Şekil 5.9'da görülen Brookfield DV-II+Pro EXTRA viskozimetresi kullanılarak belirlenmiştir. Deneye tabi tutulacak bağlayıcılar  $140 - 150$  °C arasında sıcaklıklarda ısıtılarak viskozimetre kabına yaklaşık 9 gr olacak şekilde

dökülmüş ve kap viskozimetreye yerleştirilmiştir. Daha önceden deney sıcaklığına getirilmiş viskozimetre sıfırlandıktan sonra, No:27 silindirik mil 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 dönme 30 dakika boyunca devam ettikten sonra saf ve modifiye bağlayıcıların birer dakika aralıklarla üç okuma değeri alınmış ve bu değerlerin ortalaması deney sonuçları olarak kaydedilmiş ve sonuçları Tablo 5.21-5.23’de verilmiştir.

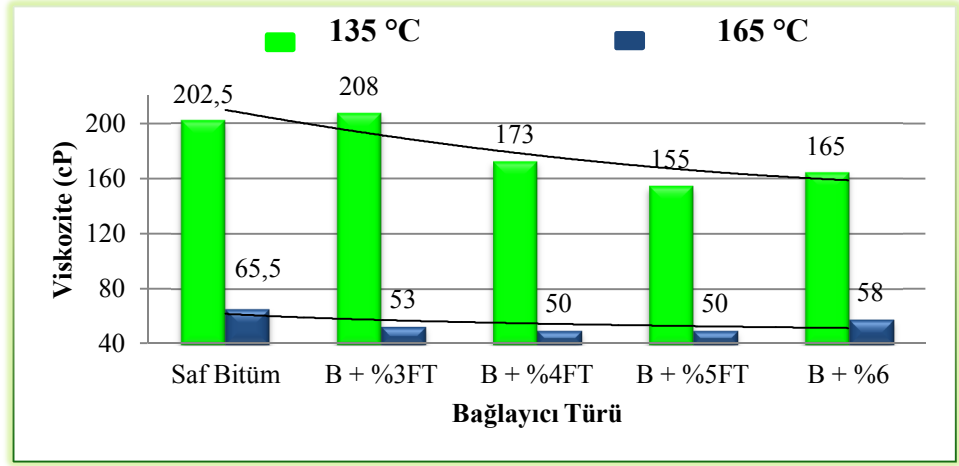


Şekil 5.9. “Brookfield DV-II+Pro EXTRA” viskozimetre cihazının ana görüntüsü.

Tablo 5.23. Saf ve FT Parafin katkılı modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri.

Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		η <sub>modifiye</sub> / η <sub>saf</sub>		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B 160/220	202,5	65,5	1	1	135-142	122-128
<b>B+FT Parafin</b>						
B+%3FT	208	53	1,03	0,81	136-141	125-130
B+%4FT	173	50	0,85	0,76	129-135	116-121
B+%5FT	155	50	0,77	0,76	129-135	116-121
B+%6FT	165	58	0,82	0,89	130-137	116-123

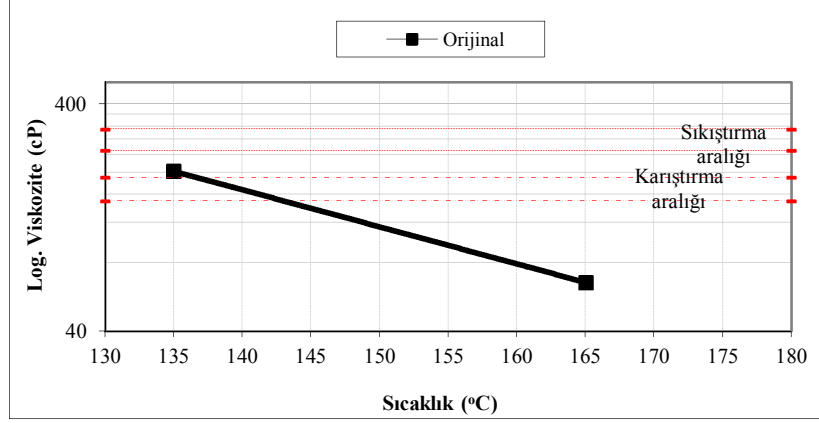
Saf ve FT ile modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Çizelge 5.20’de grafik olarak gösterilmiştir.



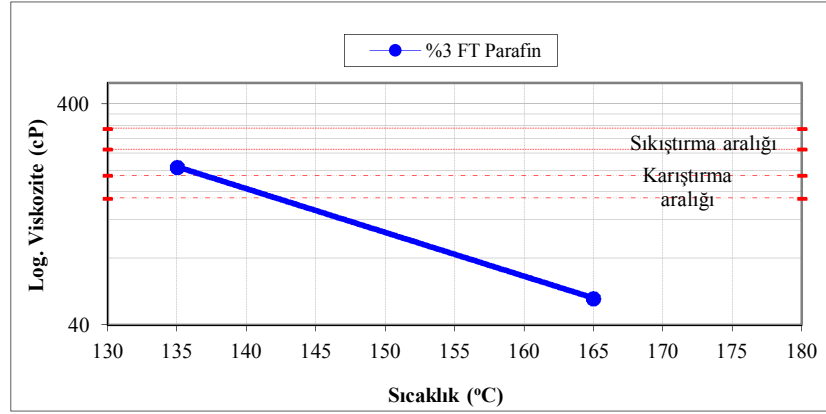
**Çizelge 5.20.** Saf ve FT Parafin İle modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.

Superpave yönteminde, bağlayıcıların sıcak karışımda kullanılması durumunda, karıştırma için  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırma için  $280 \pm 30$  cP viskozite değerlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralıklarını belirleyebilmek amacıyla, iki farklı sıcaklıkta (135 ve 165 °C) yapılan viskozite deneylerinden elde edilen viskozite değerleri yardımıyla çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır. Yukarıda ifade edilen karıştırma ( $170 \pm 20$  cP) ve sıkıştırma ( $280 \pm 30$  cP) viskozite değerlerinin viskozite-sıcaklık grafiğini kestiği aralıklar belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları bulunur.

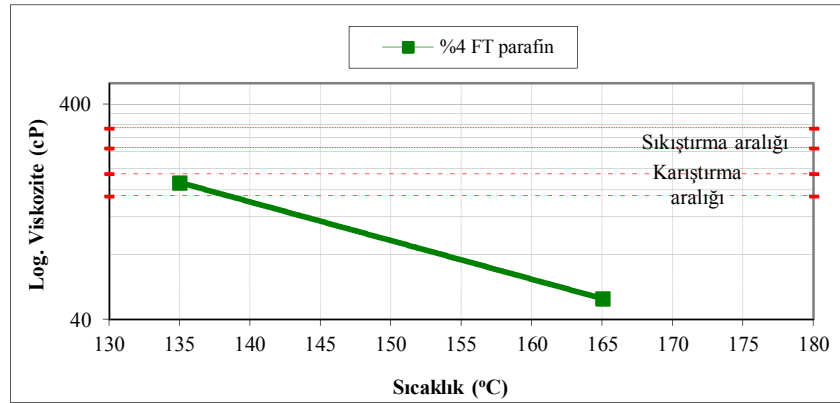
Çalışmada kullanılan saf ve FT Parafin modifiyeli karışımların viskozite-sıcaklık grafikleri Çizelge 5.21–5.25’de gösterilmiştir. Bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bu grafiklerden faydalanılarak tespit edilmiş ve Tablo 5.23’de verilmiştir.



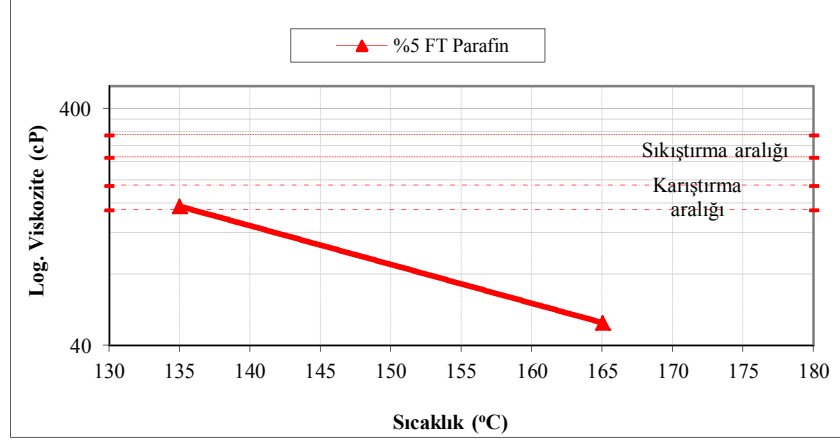
Çizelge 5.21. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



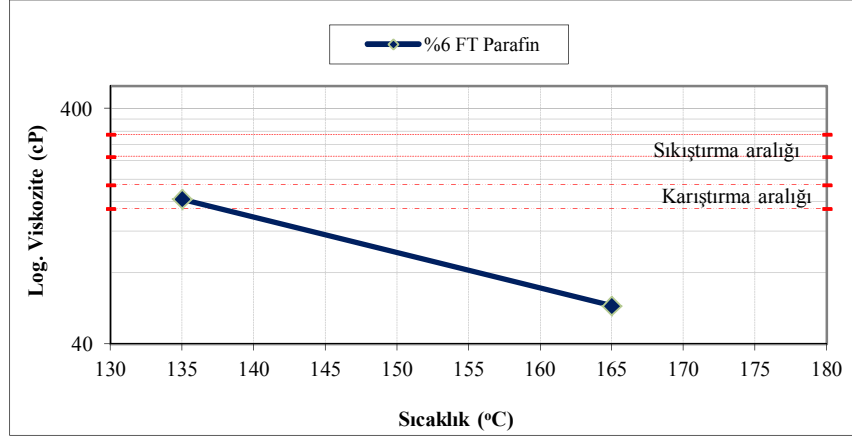
Çizelge 5.22. B+%3FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.23. B+%4FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.24. B+%35FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.25. B+%6FT bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.

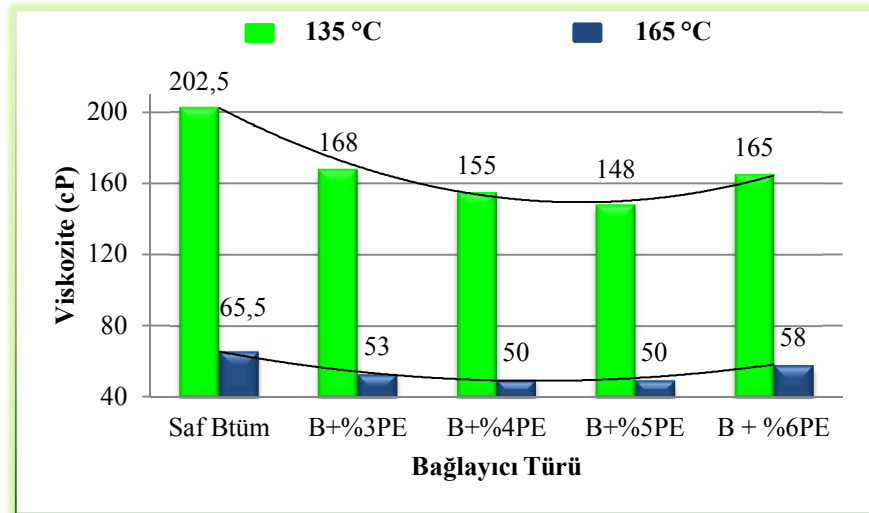
Saf ve FT katkıli modifiye bağlayıcıların üzerinde 135 °C ve 165 °C'de yapılmış olan dönel viskozite (RV) deney sonuçlarına göre; saf bitüme artan miktarlarda (%4, %5 ve %6) FT Parafin katkı ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinde önemli düşüşler sağlanmıştır. Ancak, B+%3FT modifiyeli bitümde 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 208 cP'ye kadar yükselmişken, 165 °C'de ise 65 cP'den 53 cP'ye inmiştir. B+%4FT katkı ilavesiyle, saf bitümün 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 173 cP'ye düşerken, 165 °C'de ise 65 cP'den 50 cP'ye inmiştir. Bu düşüş B+%5FT'nin 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 155 cP'ye, 165 °C'de ise 65 cP'den 50 cP'ye kadar devam ederken B+%6FT'nin 135 °C'deki viskozite değeri 165 cP'ye, 165 °C'de ise 58cP'ye yükselme görülmüştür.

Böylesine bir sonuç, yani modifiye bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin az da olsa düşmesi bağlayıcıların akışkanlığının geliştiği anlamına gelmektedir. Ancak, geleneksel deneyler sonucundaki yumuşama noktasında artış ve penetrasyonda düşüş bağlayıcının sertleştiği anlamına geldiği için katkı olarak kullanılan ticari mumların bağlayıcının kıvamını iki taraflı etkilediği anlaşılmaktadır. Yani, saf bitüme nazaran hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıklardaki böylesine düşüşler gerek enerji tasarrufunda gerekse çevreye zararın azalması konusunda büyük bir avantaj sağladığı anlamına gelmektedir.

**Tablo 5.24.** Saf ve PE katkılı modifiye bağlayıcılarının viskozite değerleri.

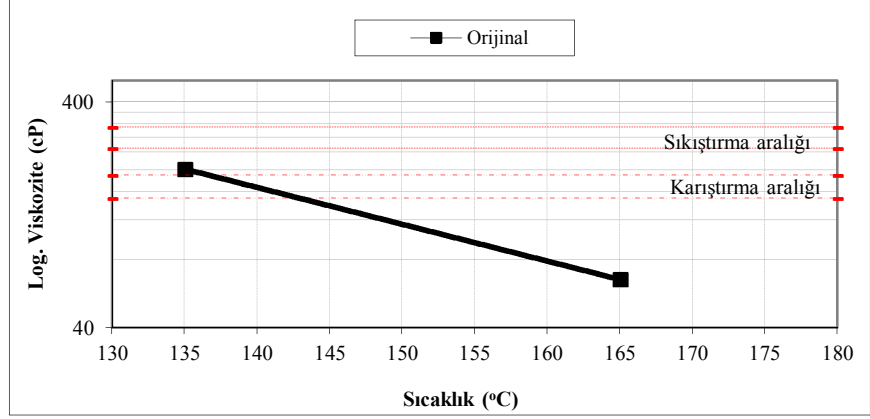
Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		η <sub>modifiye</sub> / η <sub>saf</sub>		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B 160/220	202,5	65,5	1	1	135-142	122-128
<b>B+PE</b>						
B+%3PE	168	60	0,83	0,92	133-140	118-125
B+%4PE	155	53	0,77	0,81	128-135	115-121
B+%5PE	148	53	0,73	0,81	129-136	114-120
B+%6PE	165	50	0,81	0,76	131-137	119-124

Saf ve PE modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Çizelge 5.26'da grafik olarak gösterilmiştir.

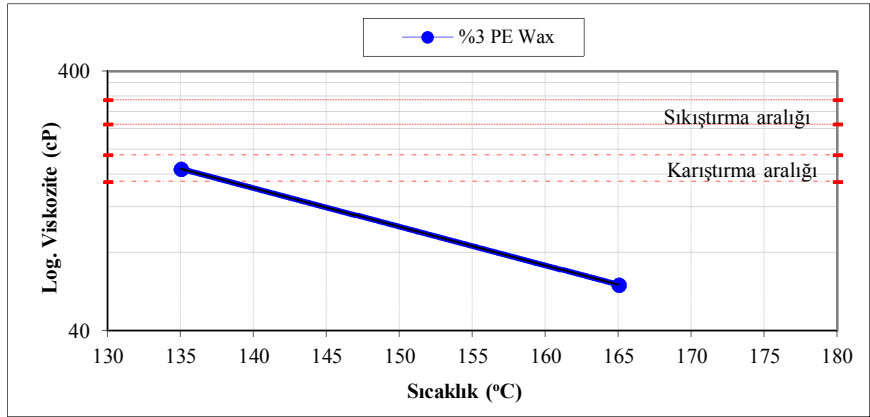


**Çizelge 5.26.** Saf ve PE ile modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.

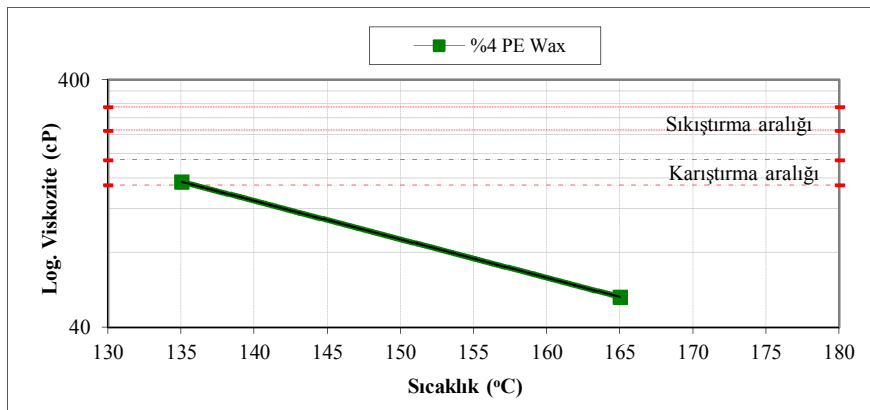
Çalışmada kullanılan saf ve PE modifiyeli karışımların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 5.27–5.31’de gösterilmiştir. Bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bu grafiklerden faydalanılarak tespit edilmiş ve Tablo 5.24’te verilmiştir.



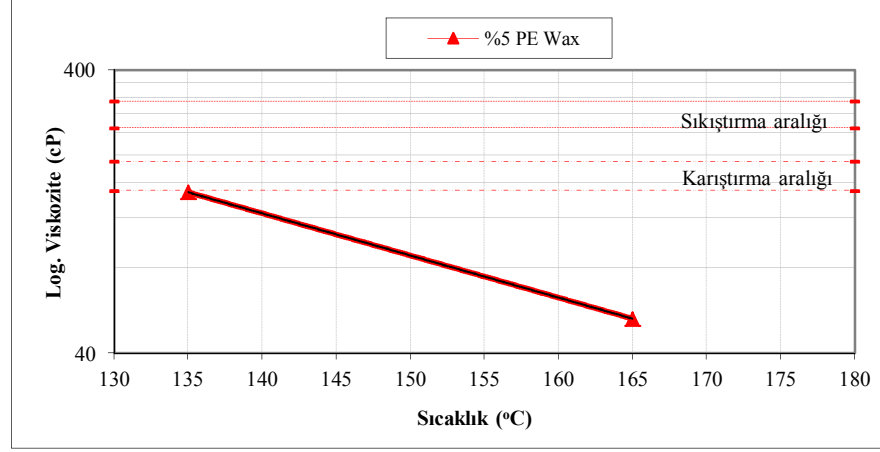
Çizelge 5.27. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



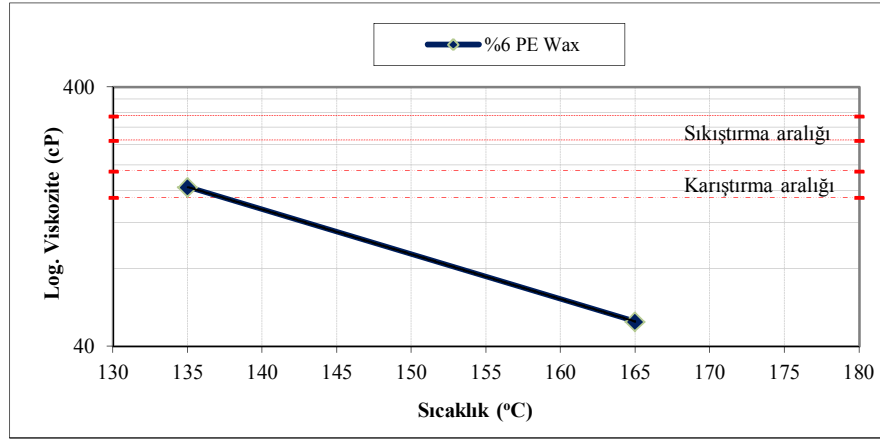
Çizelge 5.28. B+%3PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.29. B+%4PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.30. B+%5PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.31. B+%6PE bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.

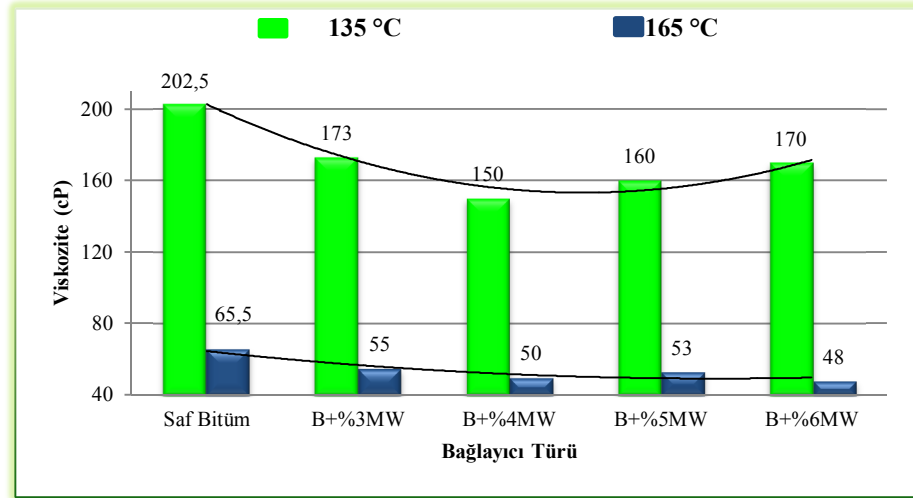
FT katkısında olduğu gibi PE katkısının da bitümü sertleştirdiği ancak akışkanlığı geliştirici özelliği sayesinde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir.

B+%3PE modifiyeli bitümde 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 168 cP'ye kadar düşmüşken, 165 °C'de ise 65 cP'den 60 cP'ye inmiştir. B+%4PE katkı ilavesiyle, saf bitümün 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 155 cP'ye düşerken, 165 °C'de ise 65 cP'den 53 cP'ye inmiştir. Bu düşüş B+%5PE 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 148 cP'ye, 165 °C'de ise 65 cP'den 53 cP'ye kadar devam ederken B+%6PE'in 135 °C'deki viskozite değeri 165 cP'ye yükselmiş, 165 °C'de ise 50 cP'ye düşüş göstermeye devam etmiştir.

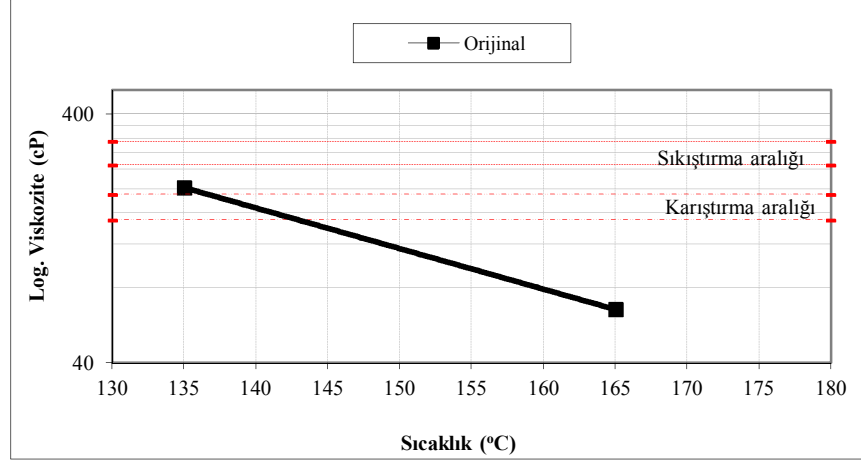
**Tablo 5.25.** Saf ve MW katkıli modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri.

Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 160/220	202,5	65,5	1	1	135-142	122-128
<b>B+MW</b>						
B+%3MW	173	55	0,85	0,84	133-139	120-126
B+%4MW	150	50	0,74	0,76	127-134	114-120
B+%5MW	160	53	0,79	0,81	130-136	117-122
B+%6MW	170	48	0,84	0,73	133-138	121-126

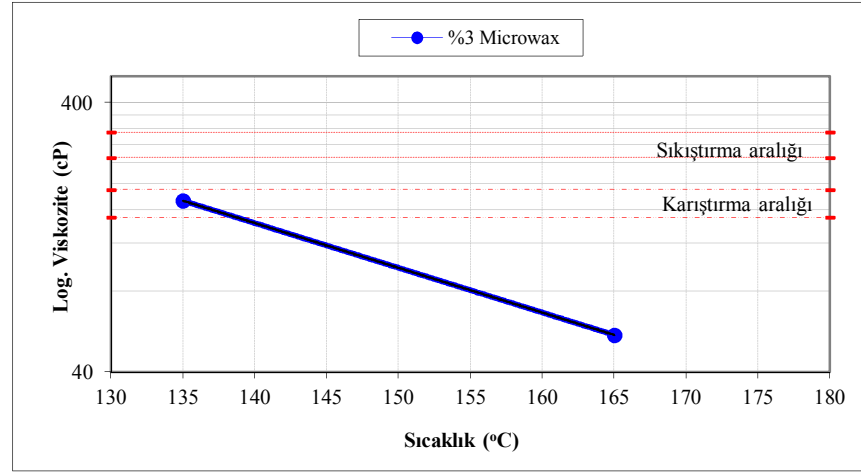
Saf ve MW modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Çizelge 5.32’de grafik olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 5.32.** Saf ve Microwaxla modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki.

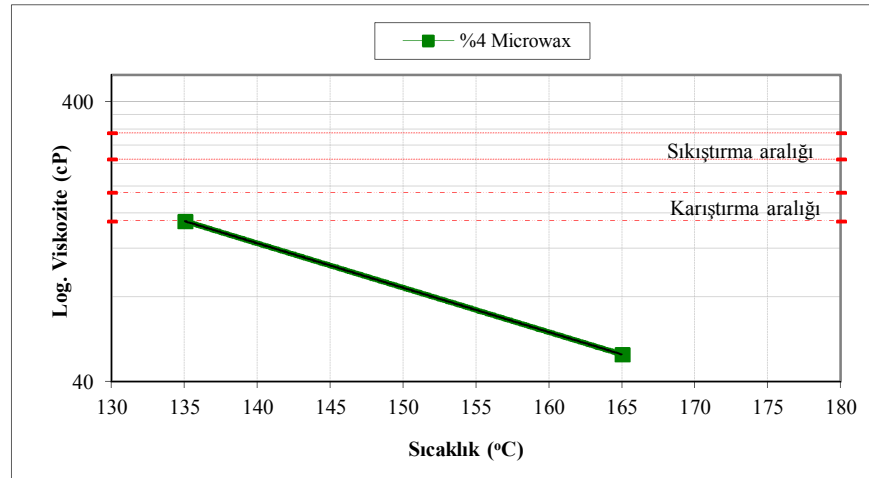
Çalışmada kullanılan saf ve MW modifiyeli karışımların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 5.33–5.37’de gösterilmiştir. Bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bu grafiklerden faydalanılarak tespit edilmiş ve Tablo 5.25’de verilmiştir.



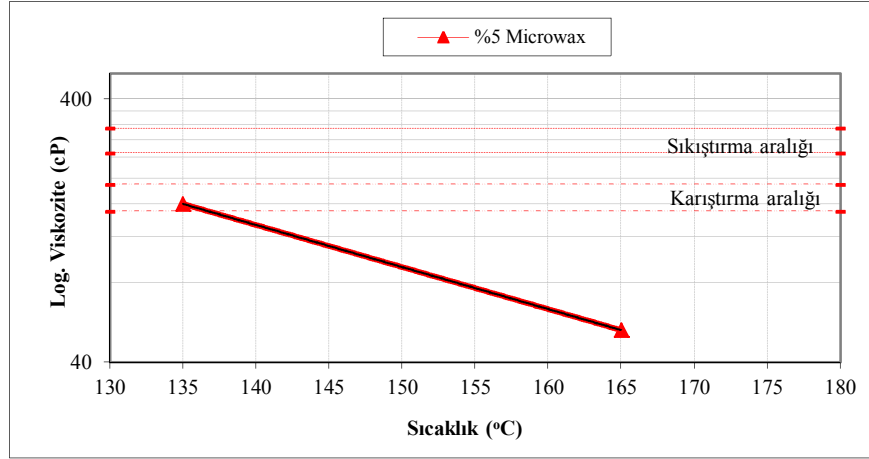
Çizelge 5.33. B 160/220 bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



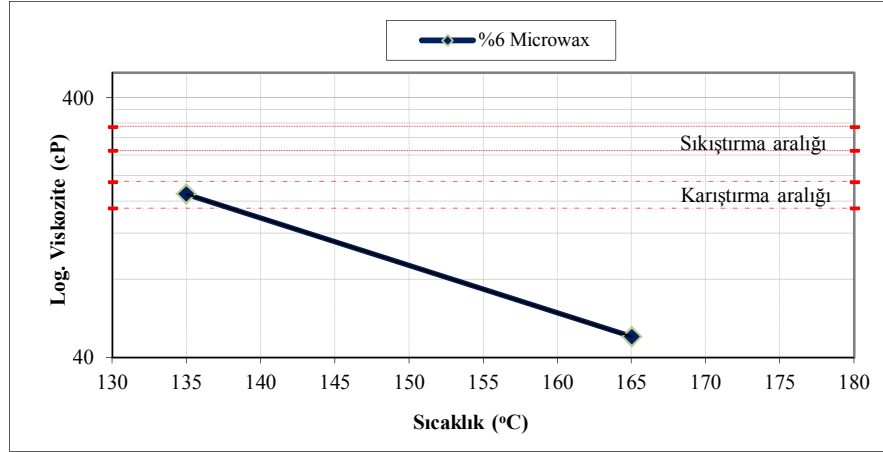
Çizelge 5.34. B+%3MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.35. B+%4MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.36. B+%5MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.



Çizelge 5.37. B+%6MW bağlayıcı viskozitesinin sıcaklıkla değişimi.

MW katkısının ilave edilmesiyle bağlayıcının penetrasyonu ve yumuşama noktasında iyileşme olmamasına rağmen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında belli başlı düşüşler görülmektedir.

B+%3MW modifiyeli bitümde 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 173 cP'ye kadar düşmüşken, 165 °C'de ise 65 cP'den 55 cP'ye inmiştir. B+%4MW katkı ilavesiyle, saf bitümün 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 150 cP'ye düşerken, 165 °C'de ise 65 cP'den 50 cP'ye inmiştir. Bu düşüş B+%5MW 135 °C'deki viskozite değeri 202 cP'den 160 cP'ye, 165 °C'de ise 65 cP'den 53 cP'ye kadar devam ederken B+%6MW'nın 135 °C'deki viskozite

değeri B+%5MW'a nazaran 170 cP'ye yükselmiş, 165 °C'de ise 48 cP'ye düşüş göstermeye devam etmiştir.

Saf ve modifiyeli bağlayıcılar arasında kıyaslama yapılacak olursa ticari mumların hemen hemen hepsi beklenen sonuçları vermiş ve saf bitüme göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında azalma saptanmıştır. Ancak bazı yüzdelerde, örnek olarak B+%6PE ve B+%6MW'nin 135 °C'deki viskozite değerleri artış göstermişken 165 °C'deki viskozite değerleri azalmaya devam etmiştir. Tüm ilave edilen yüzde içinden %4 katkı oranı optimum olarak seçilebilir. Çünkü bu oranlar saf bitümün 138,5 °C olan karıştırma sıcaklığın 132 °C'ye (B+%4FT), 131 °C'ye (B+%4PE) ve 130,5 °C'ye (B+%4MW) indirmiş, 125 °C olan sıkıştırma sıcaklığın ise 118,5 °C'ye (B + %4FT), 118 °C'ye (B+%4PE) ve 117 °C'ye (B+%4MW) düşürerek dört yüzde içerisinde en iyi sonucu vermiştir.

## 5.2 Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler

Modifiye edilerek B 160/220 penetrasyonlu bağlayıcısı üzerinde yapılan tüm deneyler sonucunda 12 farklı yüzde arasından T.C.K. Modifiye Bitüm Şartnamesine göre (Ek 2) B+FT%5 ve B+PE%6 olduğu görülmüştür. Saf ve B+FT%5, B+PE%6 numunelerinin OBİ'lerini bulmak için toplamda 45 numune hazırlanmıştır. Marshall test deneyi sırasında stabilite ve akma değerleri direkt test aygıtından okunurken, gerekli olan diğer değerler hesap yöntemiyle bulunmuştur. Gerekli olan OBİ'ler bulunduktan sonra saf ve B+FT%5, B+PE%6 numunelerinin nem hasarına karşı olan hassasiyetlerini tespit etmek için (Lottman testi (ASTM D4867)) her bağlayıcı türü ile 6'şar numuneden hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları incelenmiş ve açıklanmıştır.

### 5.2.1 Optimum bitüm içeriklerinin (OBİ) belirlenmesi

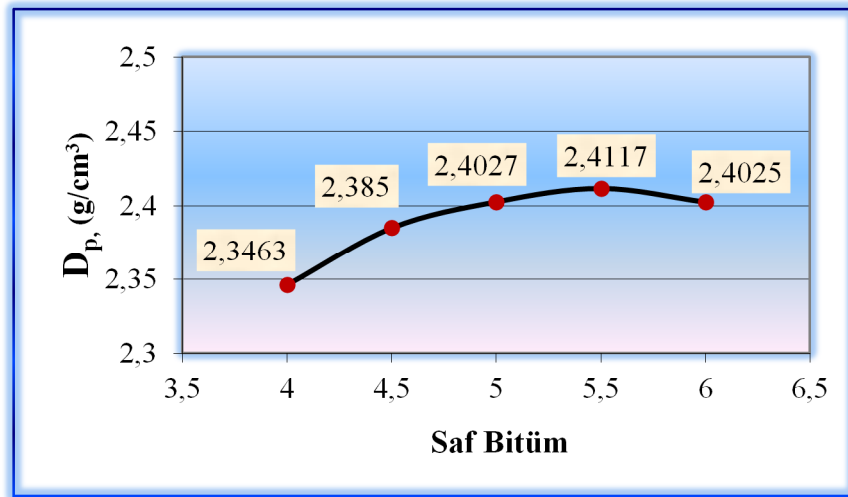
B 160/220 saf bitümü ve ticari mum katkılı bağlayıcılar, toplam agrega ağırlığının % 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 ve 6,0'sı oranında kullanılmış ve her bir yüzde için üçer numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymun kuru

yüzey ağırlıkları alınarak Formül 4.1 – 3.12'nin yardımıyla hacim özgül ağırlıkları ( $D_p$ ), boşluk oranları ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları ( $V_f$ ) belirlenmiştir. Bu değerlerin bulunması Ek – 4,5, ve 6'da verilmiştir. 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.

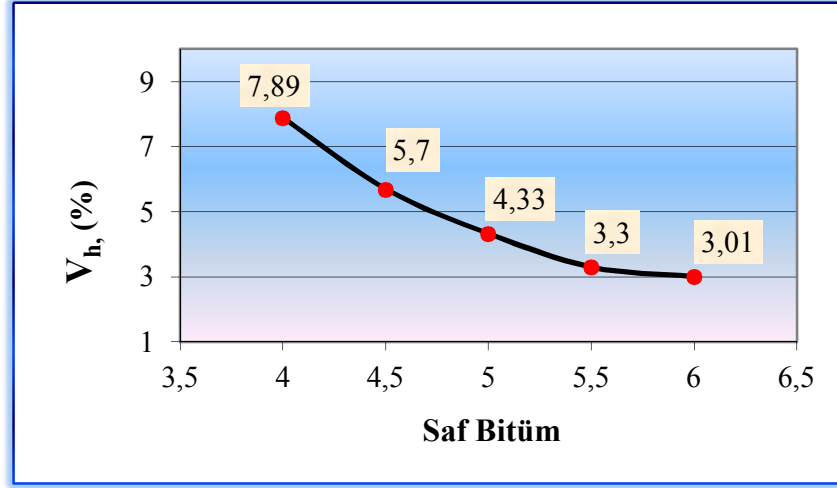
Tablo 5.26, B 160/220 bağlayıcıyla hazırlanmış olan numunelerin sonuçlarını, Çizelge 5.38 – 5.43 ise aynı bağlayıcı kullanılarak elde edilen numunelerin optimum bitüm içeriklerinin tayininde kullanılan grafikleri göstermektedir.

**Tablo 5.26.** B 160/220 bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler.

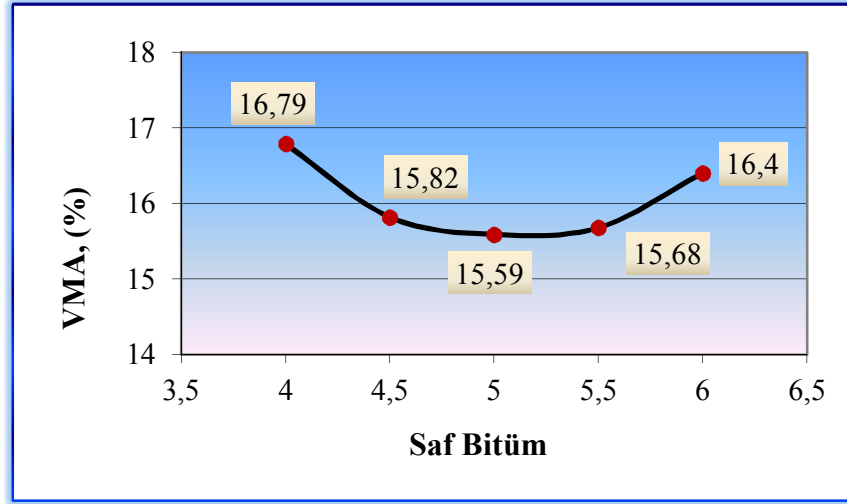
Bitüm, (%)	$D_p$ , (g/cm <sup>3</sup> )	$V_h$ , (%)	VMA, (%)	$V_f$ , (%)	Akma, (mm)	Stabilite, (kgf)
4	2,3463	7,89	16,79	52,97	2,56	1138
4,5	2,3850	5,70	15,82	63,96	2,67	1201
5	2,4027	4,33	15,59	72,21	3,26	1098
5,5	2,4117	3,30	15,68	78,93	3,93	1004
6	2,4025	3,01	16,40	81,63	5,31	853
5,2	<b>2,4004</b>	<b>4,16</b>	<b>15,83</b>	<b>73,71</b>	<b>3,59</b>	<b>1101</b>



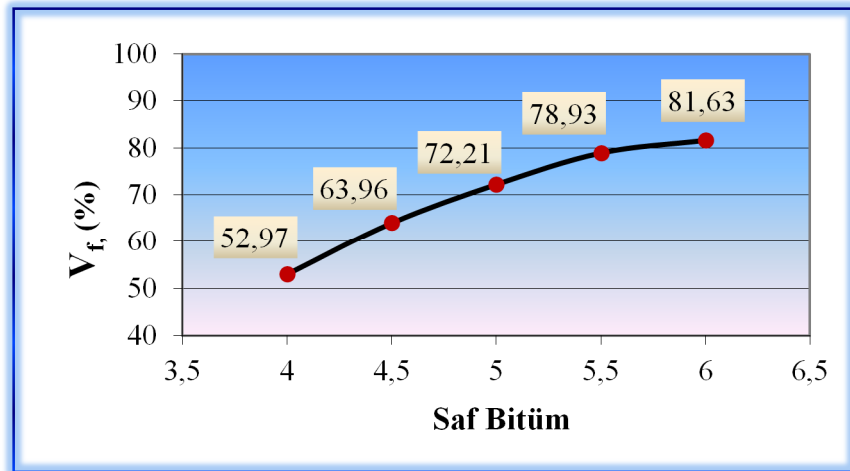
**Çizelge 5.38.** B 160/220 kullanılan numunelerde  $D_p$  - % bitüm ilişkisi.



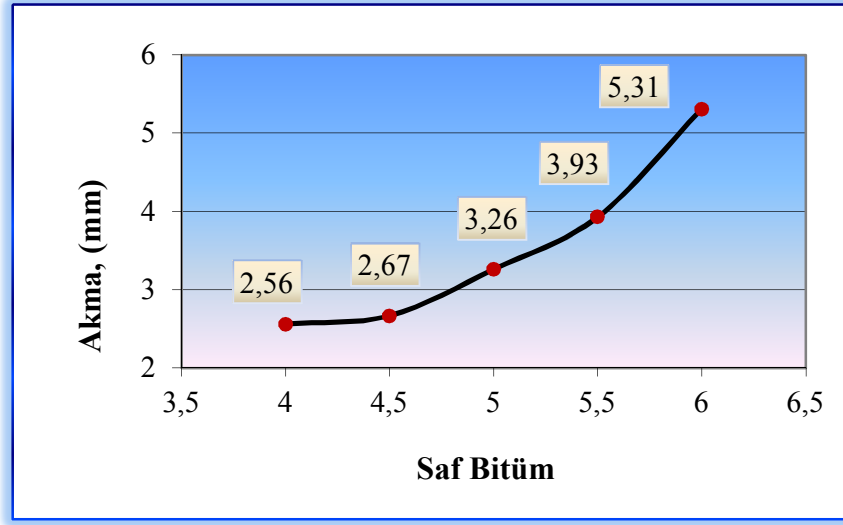
Çizelge 5.39. B 160/220 kullanılan numunelerde V<sub>h</sub> - % bitüm ilişkisi.



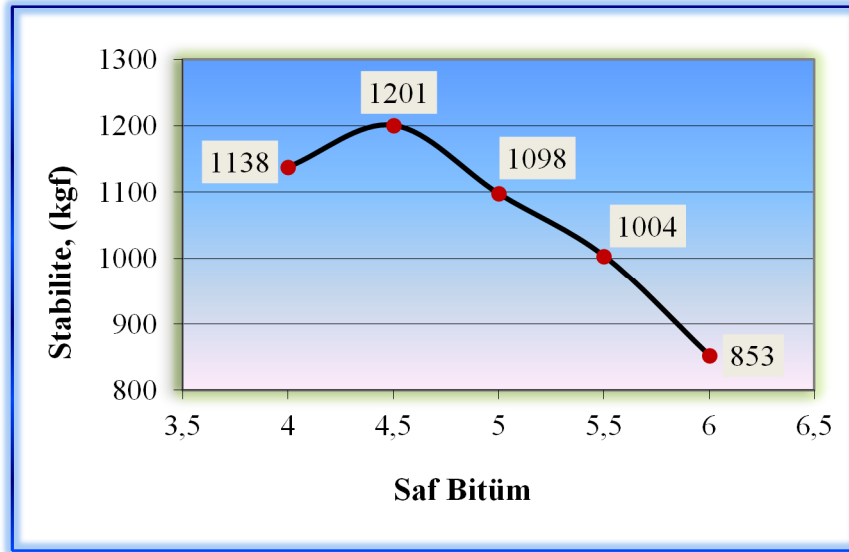
Çizelge 5.40. B 160/220 kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.41. B 160/220 kullanılan numunelerde V<sub>f</sub> - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.42. B 160/220 kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.

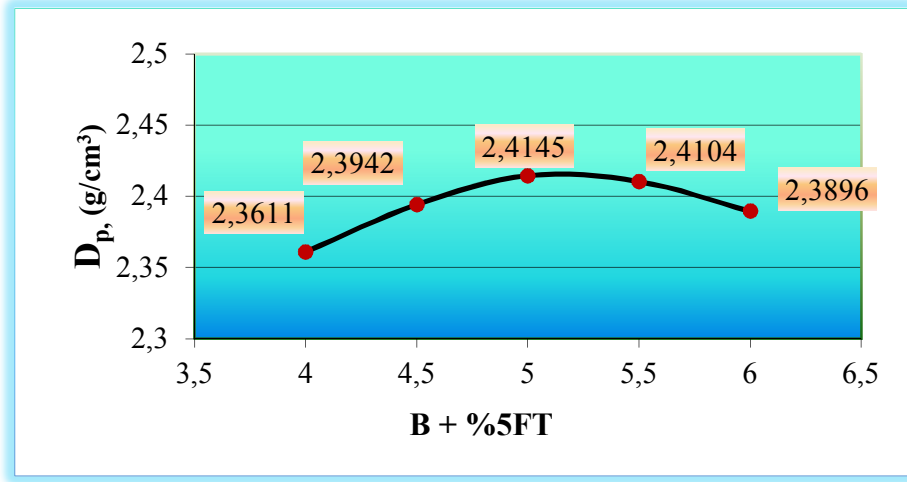


Çizelge 5.43. B 160/220 kullanılan numunelerde Stabilite - % bitüm ilişkisi.

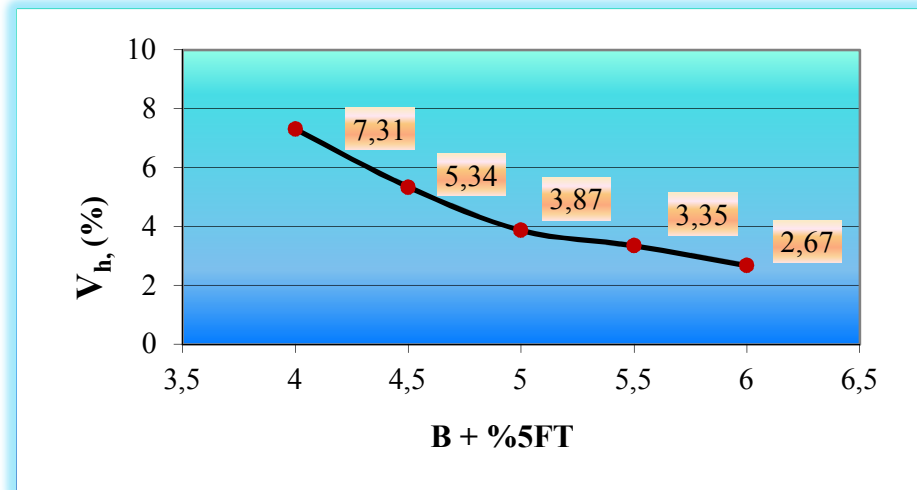
Tablo 5.27’de B+%5FT bağlayıcısı ile hazırlanmış olan karışım numunelerin sonuçlarını, Çizelge 5.44 – 5.49 ise aynı bağlayıcının OBİ hesabında kullanılan grafiklerini göstermektedir.

**Tablo 5.27.** B 160/220+%5FT bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler

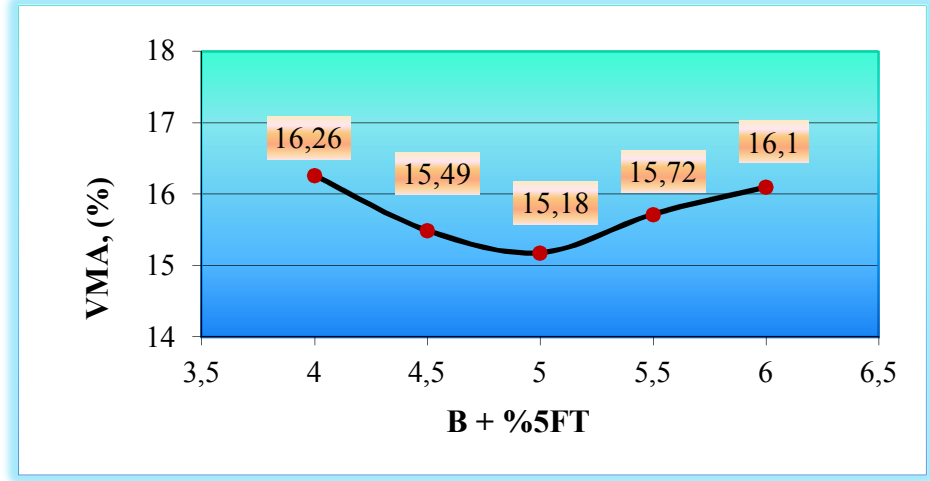
Bitüm, (%)	D <sub>p</sub> , (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>h</sub> , (%)	VMA, (%)	V <sub>f</sub> , (%)	Akma, (mm)	Stabilite, (kgf)
4	2,3611	7,31	16,26	55,03	2,87	1040
4,5	2,3942	5,34	15,49	65,55	3,34	1204
5	2,4145	3,87	15,18	74,53	3,78	1199
5,5	2,4104	3,35	15,72	83,41	4,14	1039
6	2,3896	2,67	16,10	83,41	4,14	917
<b>5,03</b>	<b>2,4059</b>	<b>4,15</b>	<b>15,50</b>	<b>73,22</b>	<b>3,23</b>	<b>1142</b>



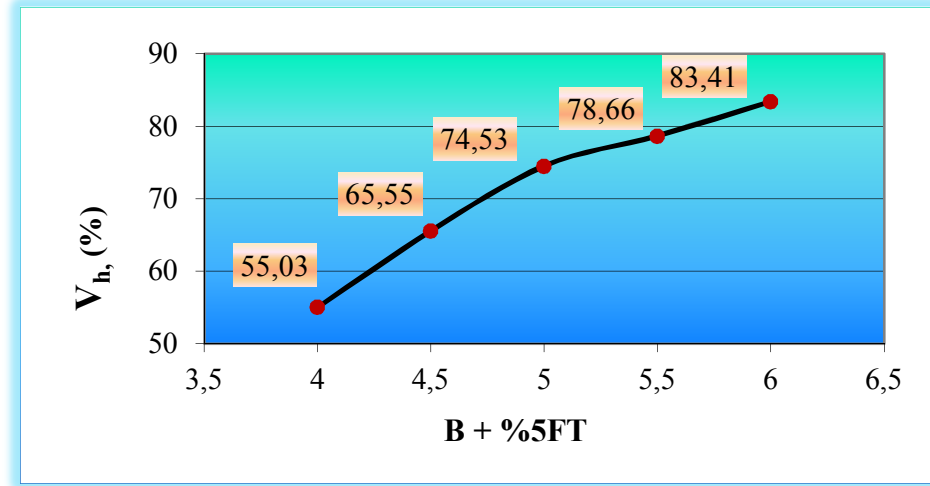
**Çizelge 5.44.** B+%5FT kullanılan numunelerde D<sub>p</sub> - % bitüm ilişkisi.



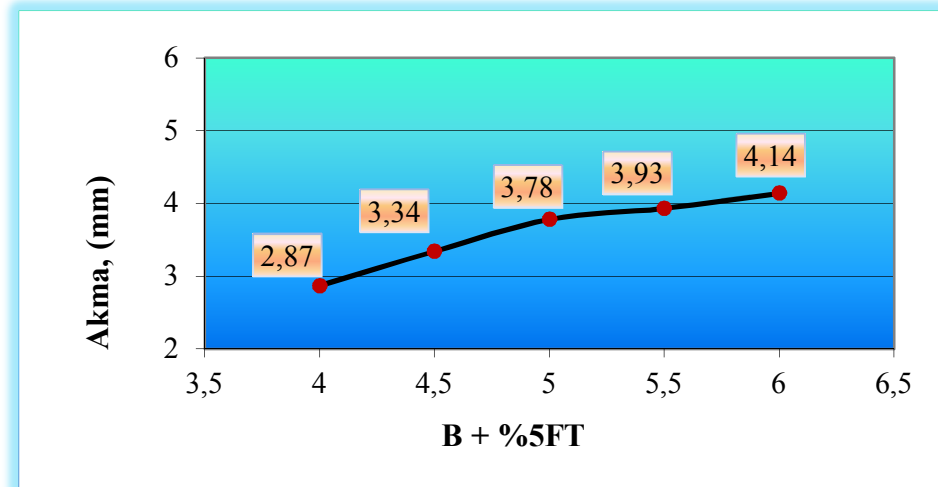
**Çizelge 5.45.** B+%5FT kullanılan numunelerde V<sub>h</sub> - % bitüm ilişkisi.



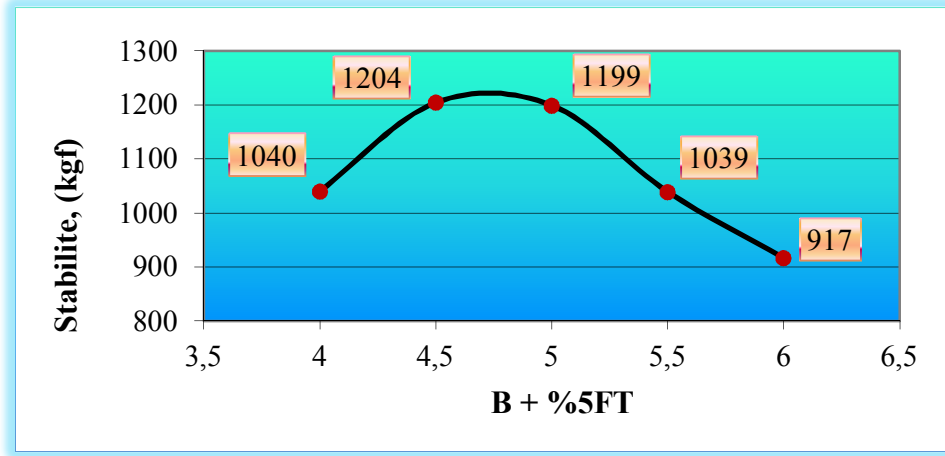
Çizelge 5.46. B+%5FT kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.47. B+%5FT kullanılan numunelerde V<sub>f</sub> - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.48. B+%5FT kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.

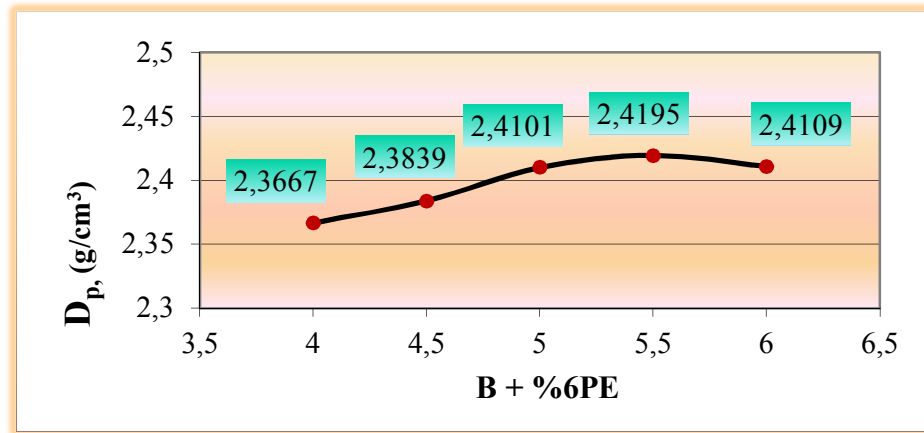


Çizelge 5.49. B+%5FT kullanılan numunelerde Stabilité - % bitüm ilişkisi.

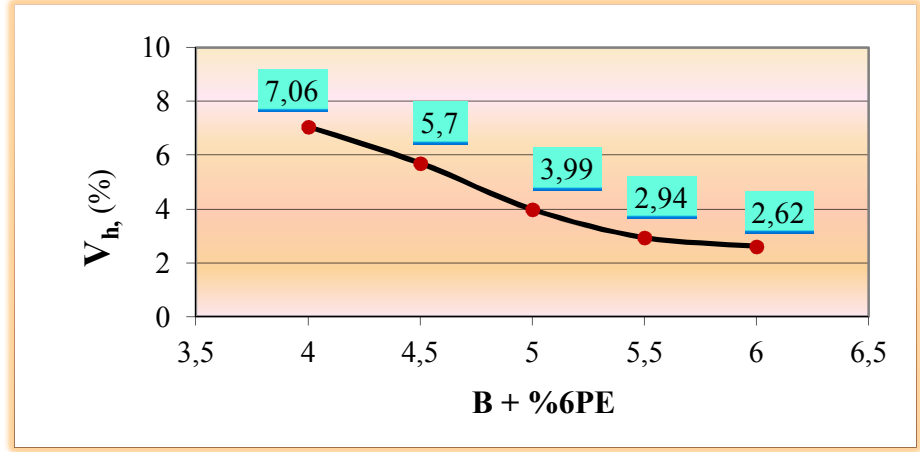
B 160/220 bitümüne %6 oranında PE mumu katılarak elde edilen karışım numunelerin sonuçları Tablo 5.28’de, OBİ’nin belirlenmesinde kullanılan grafikler ise Çizelge 5.50 – 5.55’te gösterilmiştir.

Tablo 5.28 B 160/220+%6PE bağlayıcısını içeren numunelerin optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler

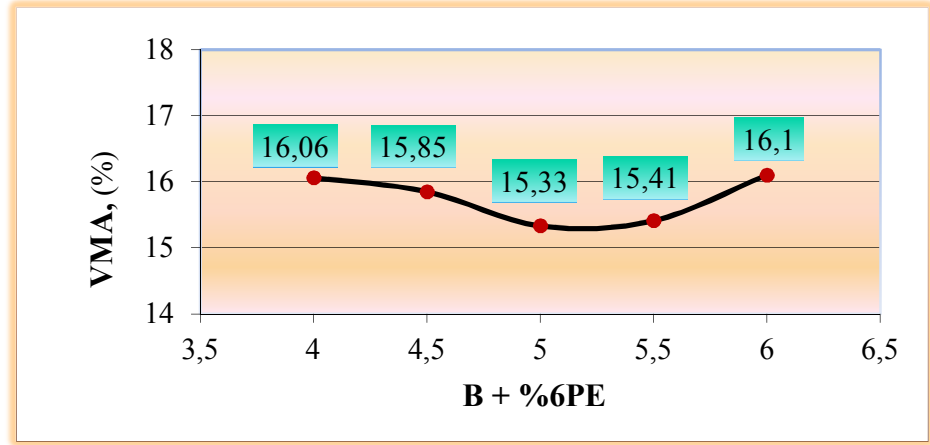
Bitüm, (%)	D <sub>p</sub> , (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>h</sub> , (%)	VMA, (%)	V <sub>f</sub> , (%)	Akma, (mm)	Stabilité, (kgf)
4	2,3667	7,06	16,06	56,06	2,37	995
4,5	2,3839	5,70	15,85	64,04	2,42	1066
5	2,4101	3,99	15,33	73,95	2,44	1103
5,5	2,4195	2,94	15,41	80,90	3,22	989
6	2,4109	2,62	16,10	83,73	4,03	941
5,24	2,4186	3,33	15,23	78,14	3,29	1132



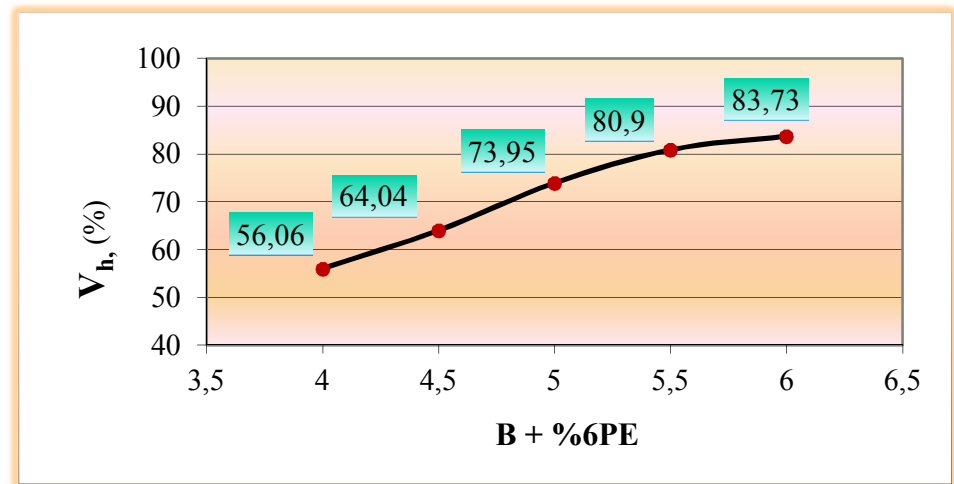
Çizelge 5.50. B+%6PE kullanılan numunelerde D<sub>p</sub> - % bitüm ilişkisi.



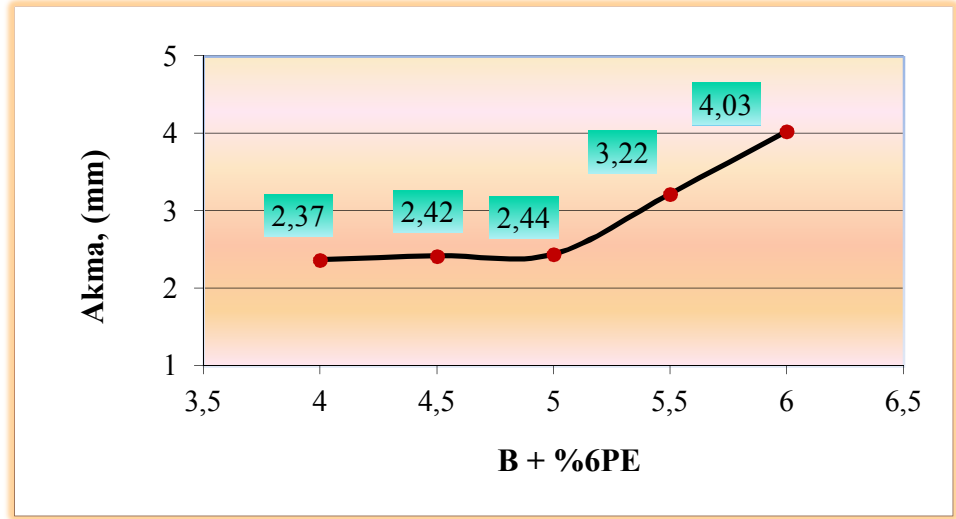
Çizelge 5.51. B+%6PE kullanılan numunelerde V<sub>h</sub> - % bitüm ilişkisi.



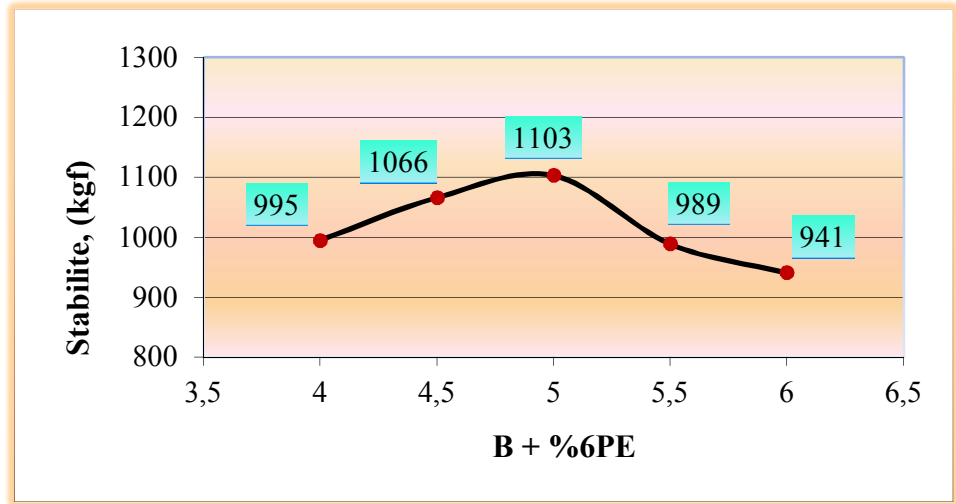
Çizelge 5.52. B+%6PE kullanılan numunelerde VMA - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.53. B+%6PE kullanılan numunelerde V<sub>f</sub> - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.54. B+%6PE kullanılan numunelerde Akma - % bitüm ilişkisi.



Çizelge 5.55. B+%6PE kullanılan numunelerde Stabilite - % bitüm ilişkisi.

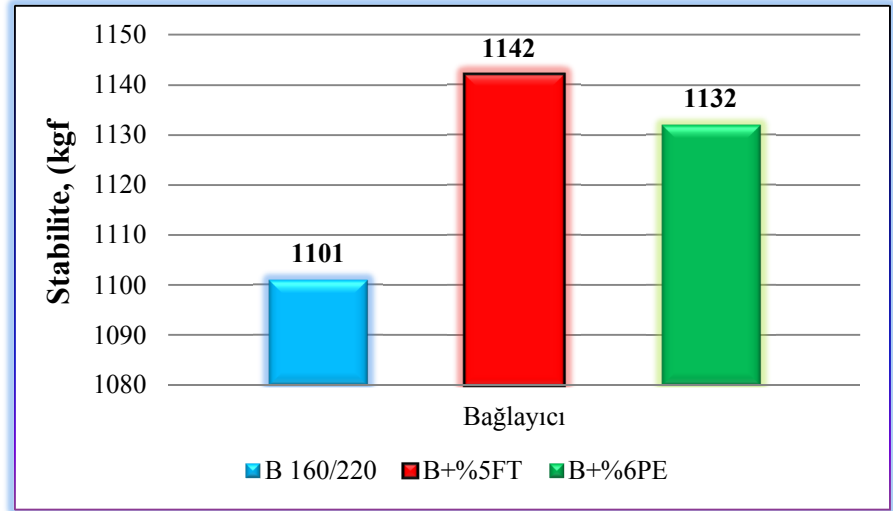
Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdelere, boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği yüzdelere alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Her bir bağlayıcı türü için OBİ'lerinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen değerler Tablo 5.26; 5.27

ve Tablo 5.28'in en altındaki satırlarında verilmiştir. Tablo 5.29, OBI'lerin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir.

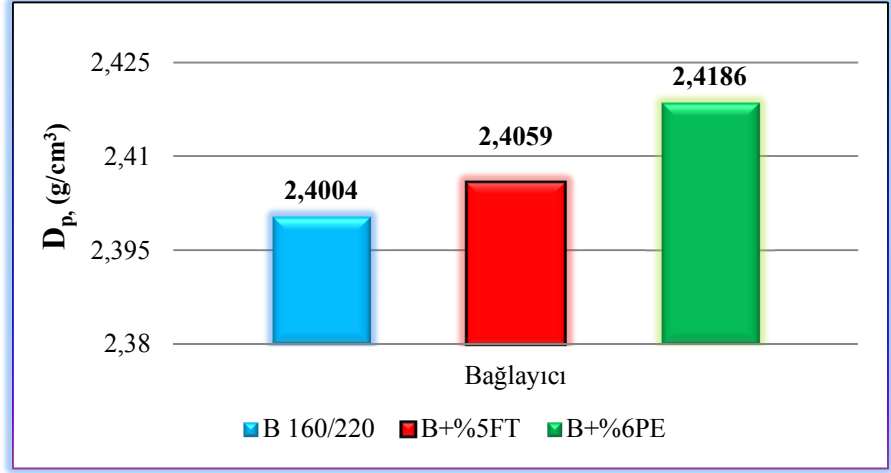
**Tablo 5.29.** Optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler.

Kriterler	B 160/220	B+%5FT	B+%6PE
Maksimum Stabilite, (%)	4,5	4,75	5
Maksimum D <sub>p</sub> , (%)	5,5	5	5,5
%4 V <sub>h</sub> , (%)	5,15	4,95	5
%80 V <sub>f</sub> , (%)	5,65	5,65	5,45
<b>Optimum</b>	<b>%5,2</b>	<b>%5,09</b>	<b>%5,24</b>

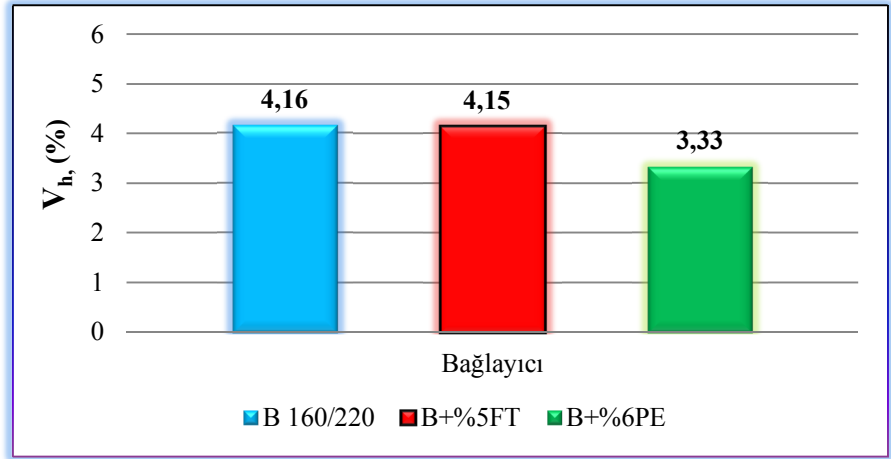
Aşağıda (Şekil 5.56 – 5.61) üç çeşit bağlayıcı ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan kontrol numunelerinden elde edilen değerler grafiksel olarak karşılaştırılmaktadır.



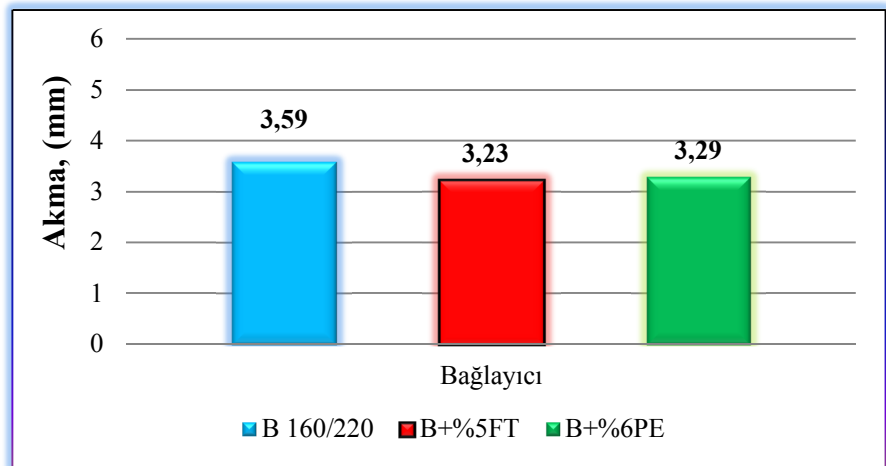
**Çizelge 5.56.** Üç farklı bağlayıcı ile OBI'de hazırlanan numunelerin stabilite kıyası.



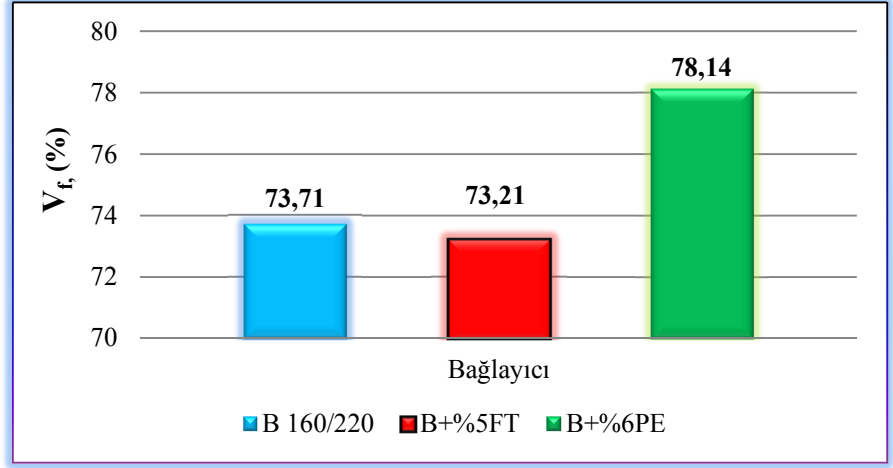
Çizelge 5.57. Üç farklı bağlayıcı ile OBI’de hazırlanan numunelerin özgül ağırlık kıyası.



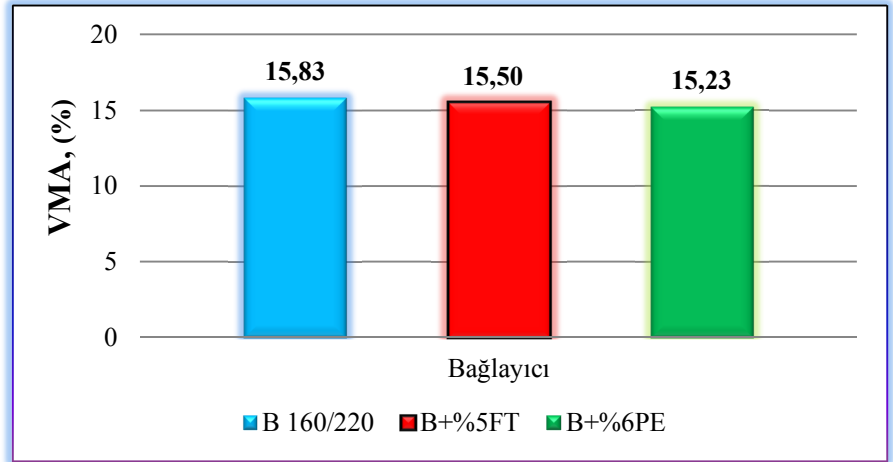
Çizelge 5.58. Üç farklı bağlayıcı ile OBI’de hazırlanan numunelerin boşluk oranı kıyası.



Çizelge 5.59. Üç farklı bağlayıcı ile OBI’de hazırlanan numunelerin akma miktarlarının kıyası.



Çizelge 5.60. Üç farklı bağlayıcı ile OBI'de hazırlanan numunelerin asfaltla dolu boşluk oranı kıyası.



Çizelge 5.61. Üç farklı bağlayıcı ile OBI'de hazırlanan numunelerin agregalar arası boşluk oranı kıyası.

Bu grafiklere göre, modifiye edilmiş numunelerin stabilitesi saf bitümlü karışımın stabilitesiyle karşılaştırıldığında en yüksek değeri B+%5FT bitümlü numunenin gösterdiği tespit edilmiştir. Özgül ağırlık konusunda en yüksek değeri B+%6PE'li numune göstermişken en düşük değeri saf bitümlü karışım göstermektedir. Saf bitümlü numune ile B+%5FT'li karışımın boşluk oranları çok yakın bir değeri vermişken B+%6PE bitümü kullanılan numunelerde %3,33 gibi çok düşük boşluk oranı tespit edilmiştir. Üç çeşit bağlayıcıdan optimum oranda kullanılarak yapılan numunelerin akmalarında en büyük değeri B 160/220

bağlayıcısı kullanılan numunelerden elde edilmişken, diğer iki bağlayıcı (B+%5FT ve B+%6PE) kullanılmış numunelerde akma değerleri hemen hemen aynı sonucu göstermiştir. Bütün numuneler içerisinde en fazla yükü %5FT katkılı bağlayıcı kullanılan numuneler taşıdığından ve yine en yüksek yük değerinde meydana gelen deformasyon miktarı anlamına gelen akma miktarları arasında en düşük değere %5FT katkılı bağlayıcı kullanılan numuneler sahip olduğundan Marshall deneyi sonucunda en iyi neticeyi %5FT katkılı bağlayıcı kullanılan numunelerin verdiği söylenebilmektedir.

### 5.2.2 Nem hasarına karşı direnç deneyi

Karışımların nem hassasiyetini AASHTO T-283 (2003) yöntemine göre tespit etmek amacıyla, 3 (B 160/220, B+%5FT ve B+%6PE) farklı karışım tipinin her biri için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Optimum bağlayıcı içeriğinde hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri tepsilere konarak 143 °C'deki fırında 2 saat bekletilerek yaşlandırılmıştır. Daha sonra, karışım numuneleri, standardın (Zaniewski, J., Viswanathan, A.G., 2006) öngördüğü ortalama %7 boşluk oranını teşkil etmek amacıyla, Marshall tokmağı ile saf ve B+%5FT için 33, B+%6PE için ise 30 darbe sayısı uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler, deneye tabi tutulmadan önce havadaki kuru (A), doygun (B) ve sudaki (C) ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulacak şartlandırılmamış (kuru) ve şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 5.30 ve Tablo 5.31'de verilmiştir.

**Tablo 5.30.** Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin fiziksel özellikleri.

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	G <sub>mb</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	G <sub>mm</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>h</sub> (%)
B 160/220	1	67,61	1254,7	1258,6	721,4	2,336	2,506	6,8
	2	67,73	1253,8	1257,8	720,3	2,333	2,506	6,92
	3	67,57	1252,8	1255,5	721,7	2,263	2,506	6,90
	<b>Ortalama</b>						<b>2,311</b>	<b>2,506</b>

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>h</sub> (%)
B+%5 FT	1	67,12	1251,6	1257,0	718,9	2,326	2,508	7,26
	2	67,48	1252,1	1255,6	721,8	2,346	2,508	6,5
	3	67,83	1252,1	1255,1	721,2	2,345	2,508	6,5
	<b>Ortalama</b>					<b>2,339</b>	<b>2,508</b>	<b>6,75</b>
B+%6 PE	1	67,25	1256,0	1260,2	722,3	2,335	2,502	6,68
	2	67,5	1250,5	1253,8	719,6	2,341	2,502	6,5
	3	67,35	1256,1	1260,7	720,0	2,323	2,502	7,15
	<b>Ortalama</b>					<b>2,333</b>	<b>2,502</b>	<b>6,78</b>

**Tablo 5.31.** Şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri.

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>h</sub> (%)
B 160/220	1	67,53	1251,4	1255,7	716,7	2,322	2,506	7,35
	2	67,17	1253,1	1256,6	720,6	2,338	2,506	6,71
	3	67,27	1253,1	1256,5	720,2	2,337	2,506	6,76
	<b>Ortalama</b>					<b>2,332</b>	<b>2,506</b>	<b>6,94</b>
B+%5 FT	1	67,18	1252,0	1255,6	719,7	2,336	2,508	6,85
	2	66,85	1250,4	1254,0	724,2	2,347	2,508	6,43
	3	66,82	1251,3	1255,1	722,4	2,348	2,508	6,4
	<b>Ortalama</b>					<b>2,344</b>	<b>2,508</b>	<b>6,56</b>
B+%6 PE	1	67,05	1248,7	1252,2	715,2	2,325	2,502	7,06
	2	67,4	1249,3	1252,4	718,3	2,339	2,502	6,51
	3	67,5	1248,9	1252,8	716,5	2,329	2,502	6,93
	<b>Ortalama</b>					<b>2,331</b>	<b>2,502</b>	<b>6,83</b>

Numunelerin fiziksel özellikleri tespit edildikten sonra, şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall deney cihazında aksel yüklemeye tabi tutularak, kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve dolaylı çekme mukavemetleri (ITS<sub>kuru</sub>) hesaplanmıştır. Şartlandırılacak numunelere ise, 13–67 kPa emme basıncı altında 30 saniye gibi bir süreyle, Şekil 5.10'da görülen bir manometre ile

vakum uygulanarak %60–80 oranında su ile doygun hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım numunelerinin doygunluk dereceleri (D), Tablo 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.10. Numunelerin manometre ile doygun hale getirilmesi.

Tablo 5.32. Şartlandırılan karışım numunelerinin doygunluk dereceleri.

Karışım Tipi	No	Şartlandırmadan Önce						Şartlandırmadan Sonra		
		A Kuru, (gr)	B Doyg., (gr)	C Suda, (gr)	V Hacim, (cm <sup>3</sup> )	V <sub>a</sub> (%)	V <sub>a</sub> (cm <sup>3</sup> )	B <sub>1</sub> Doyg., (gr)	V <sub>su</sub> (cm <sup>3</sup> )	D Doyg. (%)
B 160/220	1	1251,4	1255,7	716,7	539	7,35	39,62	1263,4	12	76,5
	2	1253,1	1256,6	720,6	536	6,71	35,97	1262,6	9,6	73
	3	1253,1	1256,5	720,2	536,3	6,76	36,25	1261,7	8,6	66
	<b>Ortalama</b>									
B+ <sup>0</sup> %5 FT	1	1252,0	1255,6	719,7	535,9	6,85	36,71	1261,0	9	66,8
	2	1250,4	1254,0	724,2	532,8	6,43	34,26	1259,4	9	76,7
	3	1251,3	1255,1	722,4	533	6,4	34,11	1259,5	8	70
	<b>Ortalama</b>									

Karışım Tipi	No	Şartlandırmadan Önce						Şartlandırmadan Sonra		
		A Kuru, (gr)	B Doyg., (gr)	C Suda, (gr)	V Hacim, (cm <sup>3</sup> )	V <sub>a</sub> (%)	V <sub>a</sub> (cm <sup>3</sup> )	B <sub>1</sub> Doyg., (gr)	V <sub>su</sub> (cm <sup>3</sup> )	D Doyg. (%)
B+%6 PE	1	67,05	1248,7	1252,2	537,0	7,06	37,91	1258,2	9,5	66,7
	2	67,4	1249,3	1252,4	534,1	6,51	34,77	1256,7	7,5	61,2
	3	67,5	1248,9	1252,8	536,3	6,93	37,17	1257,8	8,9	64,4
	<b>Ortalama</b>									<b>64,1</b>

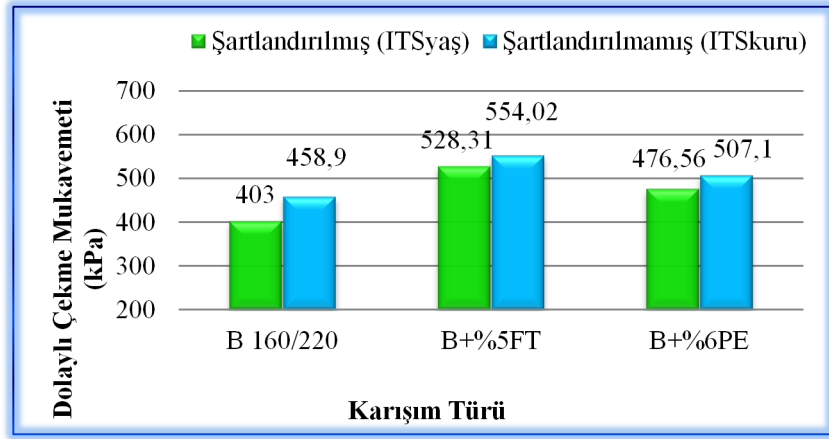
Doygun hale getirilen numuneler, 16 saat süreyle -18 °C'ye ayarlanmış bir dondurucuya yerleştirilmiştir. Dondurucudan çıkartılan numuneler 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak 25 °C'deki su banyosuna yerleştirilmiş ve 2 saat bekletildikten sonra Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye tabi tutularak kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve dolaylı çekme mukavemetleri ( $ITS_{yaş}$ ) hesaplanmıştır.

Şartlandırılmış yaş numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ( $ITS_{yaş}$ ), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine ( $ITS_{kuru}$ ) bölünerek, nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) tespit edilmiş ve sonuçları Tablo 5.33'de verilmiştir. İlave olarak Çizelge 5.62'de, kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri, Çizelge 5.63'te ise şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetlerinin, kuru numunelerin dolaylı çekme mukavemetlerine oranları (ITSR) gösterilmiştir.

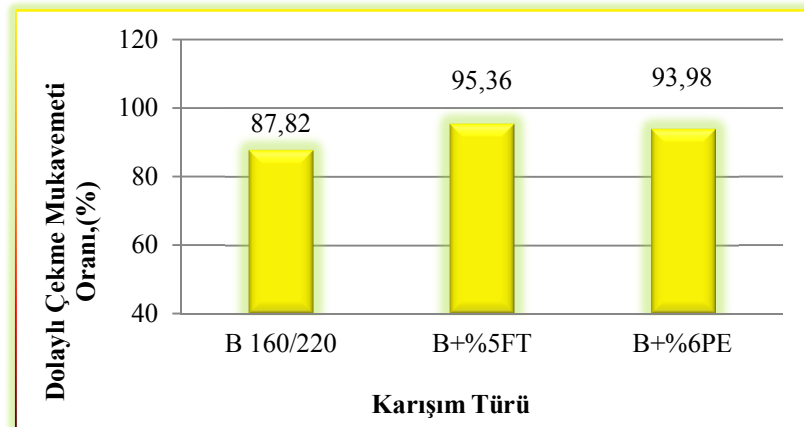
**Tablo 5.33.** Kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve oranları (ITSR).

Karışım Tipi	No	Şartlandırılmış Numuneler			Kuru Numune			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P <sub>maks</sub> (kN)	ITS <sub>yaş</sub> (kPa)	Yükseklik (mm)	P <sub>maks</sub> (kN)	ITS <sub>kuru</sub> (kPa)	
B 160/220	1	67,53	4,260	402	67,61	4,620	435,2	<b>87,82</b>
	2	67,17	4,240	402	67,73	5,070	476,8	
	3	67,27	4,280	405	67,57	4,930	464,7	
	<b>Ortalama</b>			<b>403</b>	<b>Ortalama</b>		<b>458,9</b>	

Karışım Tipi	No	Şartlandırılmış Numuneler			Kuru Numune			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P <sub>maks</sub> (kN)	ITS <sub>yaş</sub> (kPa)	Yükseklik (mm)	P <sub>maks</sub> (kN)	ITS <sub>kuru</sub> (kPa)	
B+%5 FT	1	67,18	5,690	539,48	67,12	5,620	533,32	95,36
	2	66,85	5,320	506,89	67,48	5,840	551,24	
	3	66,82	5,650	538,57	67,83	6,150	577,5	
	Ortalama			528,31	Ortalama			
B+%6 PE	1	67,05	5,000	474,98	67,25	5,350	506,71	93,98
	2	67,4	5,040	476,29	67,5	5,330	502,95	
	3	67,5	5,070	478,41	67,35	5,410	511,63	
	Ortalama			476,56	Ortalama			



Çizelge 5.62. Kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değişimi.



Çizelge 5.63. Numunelerin dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) değişimi.

Çizelge 5.62 ve Çizelge 5.63 incelendiğinde ana bağlayıcı (B 160/220) ile hazırlanan kuru ve şartlandırılmış karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemetleri sırasıyla 403 ve 458,9 kPa; dolaylı çekme mukavemeti oranı ise %87,82 bulunmuş ve bu oran şartname limiti olan min. %80 değerinden daha yüksek elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak, B 160/220 bağlayıcısı ve seçilen dizayn agrega yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu; ayrıca karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesinin yeterli olduğu; yine dolaylı çekme oranının yüksek çıkması ile karışımın sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğu görülmektedir. Modifiye edilen B+%5FT bağlayıcısı ile hazırlanmış olan kuru ve şartlandırılmış karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemeti oranı, ana bağlayıcıya göre daha yüksek elde edilmiş ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci yeterli seviyede bulunmuştur. Bununla birlikte, %6 oranında PE ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanmış olan modifiye kuru karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemetleri, saf B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanmış kuru karışım numunelerine göre 476,56 kPa gibi, şartlandırılmış karışım numuneleri için 440,93 kPa gibi bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışım numunelerindeki en büyük artış miktarı, gerek kuru karışım numuneleri için gerekse şartlandırılmış numuneler için %5FT ihtiva eden karışımlarda meydana gelmiştir. FT ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanmış olan modifiye karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları, saf (B 160/220) bağlayıcısı ile hazırlanmış karışım numunelerine göre %8,6 oranında artış göstererek dolaylı çekme mukavemeti oranındaki en büyük artış miktarı %5FT ihtiva eden karışım numunelerinden elde edilmiştir.

Bu verilerin bir sonucu olarak, genel anlamda saf ve modifiye bağlayıcılar ve seçilen dizayn agrega yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu, ayrıca karışımların orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesinin yeterli olduğu, yine dolaylı çekme oranının yüksek çıkması ile karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yeterli olduğu görülmektedir.

### 5.3 Karışımların Maliyet Hesabı

Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılacak malzemelerin tercih edilir olabilmesi için, sağladığı faydaların yanında kolaylıkla elde edilebilir ve maliyetlerinin uygun olması önem taşımaktadır.

Bitümlü karışımların maliyet hesabı için 15.02.2014 tarihi itibarıyla B 160/220 bitüm bağlayıcısının TÜPRAŞ rafineri satış fiyatı 1321,08 YTL/ton ve 2012 yılı itibarıyla Öztin. Kimya A.Ş.'i tarafından modifiyerlerin (FT, PE) fiyatları sırasıyla 9090 YTL ve 6000 YTL olarak belirlenmiştir. Tablo 5.26'da B 160/220, B+%5FT ve B+%5PE saf ve modifiye karışımların optimum bitüm içerikleri sırasıyla %5,2; %5,09 ve %5,24 olarak verildiğine göre, bu bitümler kullanılarak hazırlanan 1 ton karışım için bitümlere harcanacak para miktarı aşağıda belirlenmiştir. Saf B 160/220 bağlayıcısının 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$F_{(B-160/220)} = 1321,08 \times 5,2/100 = 68,69 \text{ YTL} \quad (5.4)$$

Saf bitüme %5FT ve %6PE katılarak elde edilen modifiye bitümlerin 1 ton fiyatı sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$F_{\text{karışım}(B + \%5FT)} = [1321,08 \times (100-5) + 9090 \times (5)]/100 = 1709,53 \text{ YTL/Ton} \quad (5.5)$$

$$F_{\text{karışım}(B + \%6PE)} = [1321,08 \times (100-6) + 6000 \times (6)]/100 = 1601,82 \text{ YTL/Ton} \quad (5.6)$$

Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$F_{(B + \%5FT)} = 1709,53 \times 5,09/100 = 87,02 \text{ YTL} \quad (5.7)$$

$$F_{(B + \%6PE)} = 1601,82 \times 5,24/100 = 83,94 \text{ YTL} \quad (5.8)$$

Bu sonuçlara göre, SK ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanan karışımların maliyetlerinde saf bağlayıcıya (B 160/220) göre, FT ve PE artış

miktarlarına bağlı olarak bir artış söz konusudur. Bu artış miktarı sırasıyla %26,69 ve %22,2 oranında gerçekleşmiştir.

## 6. SONUÇ

Tez kapsamında, ticari mumların, bitüm ve bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerine etkisi, Superpave dizayn yöntemleri de dahil olmak üzere teorik ve deneysel çalışmalarla incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Çalışmada, bağlayıcı olarak seçilen B 160/220 sınıflı bitüme üç çeşit ticari mum (FT, PE ve MW) farklı oranlarda (%3, %4, %5 ve %6) ilave edilerek modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir. Modifiye işlemi sonucunda B+%3FT, B+%4FT, B+%5FT, B+%6FT; B+%3PE, B+%4PE, B+%5PE, B+%6PE; B+%3MW, B+%4MW, B+%5MW ve B+%6MW modifiye bağlayıcıları elde edilmiş ve bunların performans sonuçları değerlendirilmiştir.
- Geleneksel test sonuçlarına göre; FT ve PE katkılı bağlayıcılarda, saf bağlayıcılara göre penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama noktasında artış gözlemlenirken MW katkılı bağlayıcılarda ise penetrasyon değerlerinde değişiklik saptanmamış, yumuşama noktasında ise katkı oranının artmasına paralel bir artış, dolayısıyla penetrasyon indekslerinde de artış meydana gelmiştir. Bu durum, FT ve PE ilavesiyle bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü, ancak MW ilavesiyle penetrasyonda belirgin bir değişikliğin olmamasına rağmen sıcaklık hassasiyetinin azaldığını ifade etmektedir.
- Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; PG sınıfı PG 52-Y olan B 160/220 bitümüne FT katkı ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde dört sınıf (%6 katkı oranında), tekerlek izi direncinde ise 10 katına kadar artış olduğu, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, ancak elastiklik özelliğinin arttığı ve FT katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanıma uygun olduğu görülmüştür. PE ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde ise iki sınıf (%6 katkı oranında), tekerlek izi direncinde 4.5 kata kadar artışlar olduğu, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin düşmesine paralel elastiklik özelliğinin arttığı ve PE katkılı bağlayıcının da yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabileceği

belirlenmiştir. MW'ın eklenmesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde bir değişkenlik olmadan aynı sınıfta (52 °C) kaldığı ve tekerlek izi direncinde değişiklik göstermediği tespit edilmiştir.

- Dönel Viskozimetre (RV) deneyi sonuçlarına göre; FT katkılı bağlayıcıların viskozitelerinde 135 °C sıcaklık için %14,57, 165 °C sıcaklık için %23,66, PE katkılı bağlayıcıların viskozitelerinde 135 °C sıcaklık için %26,91, 165 °C sıcaklık için %23,66'ya ve MW katkılı bağlayıcıların viskozitelerinde 135 °C sıcaklık için %29,93, 165 °C sıcaklık için %26,7'lik azalma meydana gelmiştir. Buna göre, katkı olarak kullanılan mumların ilavesiyle bağlayıcıların daha akışkan hale geldiği tespit edilmiştir. Ancak, bu bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinin sonuçlarından penetrasyonun düştüğü, yumuşama noktasının arttığı, dolayısıyla daha sert bir kıvama geldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde FT ve PE mumlarının orijinal bitümün penetrasyonunu düşürdüğü ve yumuşama noktasını arttırdığı halde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında belirgin bir düşüş göstererek bağlayıcının akışkanlığını iyileştirdiği söylenebilmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, saf ve mum katkılı bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanarak, çeşitli mumların BSK'ların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Marshall Metodu kullanılarak seçilen agrega gradasyonu için numunelerin optimum bitüm muhtevası %5,2 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm yüzdesine göre stabilite 1101 kgf olarak elde edilmiştir. Marshall metoduna göre %5FT ve %6PE katkılı numuneler hazırlanmıştır. Test sonucunda %5FT katkı oranında stabilitenin (1142 kgf) katkısız bitüme göre %0,41 oranında, %6PE katkı oranında stabilitenin (1132 kgf) katkısız bitüme göre %0,31 oranında arttığı görülmüştür. Akma değerleri 3,59mm olan saf bitümlü numunelere göre, hem FT hem de PE katkılı numunelerde akma değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir (3,23mm (%5FT), 3,29mm (%6PE)). Ancak, bu artış şartname değerleri olan 2-4mm arasında kalmaktadır.
- Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve AASHTO T-283 deneyleri sonucunda; %5FT katkılı karışımların ITS değerleri, kuru karışımlar için

%31,25; şartlandırılmış karışımlar için %25 kadar artış, %6PE katkılı karışımların ITS değerleri, kuru karışımlar için %18,8; şartlandırılmış karışımlar için %12 kadar artış göstermiştir. Bu artış ITSR değerleri için (%5FT) %8,6 ve (%6PE) %7 kadar olmuştur. ITS ve ITSR değerlerindeki en büyük artış miktarı, hem kuru karışım numuneleri hem de şartlandırılmış numuneler için %5FT ihtiva eden modifiye karışımlardan elde edilmiştir. %5FT ve %6PE ilavesiyle, karışımların adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiği, sertlik ve durabilitesinin arttığı, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin önemli ölçüde yükseldiği görülmüştür.

Bitüm ve karışım modifikasyonu ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunda; FT-Parafinin ve PE mumun bir katkı maddesi olarak karışımlarda %3-6 oranında kullanılması durumunda, bitüm ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle, sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, sertliğinin artmasına rağmen esneklik özelliğinin arttığı ve bağlayıcı akışkanlığının iyileştiği, agrega-asfalt adezyonu ve asfaltın kohezyonunun artış gösterdiği, su hasarlarına karşı büyük direnç sağlandığı, kısa süreli yaşlanmaya karşı direncin arttırdığı, kaplama yorulma direncinin yükseldiği ve özellikle yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı büyük direnç oluştuğu görülmüştür. MW mumun katkı maddesi hakkında olumlu sonuç olarak bağlayıcı akışkanlığın iyileştirici özelliğe sahip olduğu, B-160/220 gibi yumuşak bitümün sıcaklık hassasiyetinin düşürdüğü ve kısa süreli yaşlanmaya karşı olumlu etki gösterdiği söylenebilmektedir. Ayrıca, FT ve PE ilavesiyle karışımların maliyetlerinde artışlar olmasına karşın, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı bakım-onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha aza indireceğinden uzun vadede daha ekonomik olacağı düşünülmektedir.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Airey, G.D.**, 2002, Rheological evaluation of ethlene vinly acetate polymer modified bitumens, *Constructio n and Building Materials*, 16: 473 – 487 pp.
- Asfalt ve Uygulamaları**, 2001, İSFALT bilimsel yayınları, No: 1, 280 s.
- Asfalt El Kitabı**, 2002, İsfalt Bilimsel Yayınları, No:2, 573 s.
- Bagampadde, U.**, 2005, Investigations on Moisture Damage-related Behaviour of Bituminous Materials, Doctoral Thesis, Civil and Architectural Engineering, KTH, Sweden, 45p.
- Bahia H.U., and Anderson D.A.**, 1992, Physical Hardening of Paving Grade Asphalts as Related to Compositional Factors, Washington, No: 4, 204 p.
- Bahia, H.U., and Anderson, D.A.**, 1995, Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties, *Transportation Research Record 1488*, TRB, National Research Council, Washington, 32-39 pp.
- Balta, İ.**, 2004, Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224s.
- Barth E.J.**, 1962, *Asphalt, Science and Technology*, Gordon and Breach science publishers, New York, London.
- Bayındırlık Bakanlığı**, 1974, Yapı İşleri Birim Fiat Tarifleri T.C. Bayındırlık Bakanlığı Personeli Biriktirme ve Yardımlaşma Sandığı, 47, Ankara, 156s.
- Boucher J.L.**, 1991, Wax in asphalt - a literature review, prepared for Strategic Highway Research Program by Southwestern Laboratories, Houston Texas.
- Butz T., Rahimian I., and Hildebrand G.**, 2001, Modification of road bitumens with the Fischer-Tropsch paraffin Sasobit, *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, 1: issue 2.
- Daly, W.H., Zhaoyao, Q., and Negulescu, I.**, 1993, Preparation and characterization of asphalt – modified polyethylene blends. *Transportatiton Research Record*, 1391: 56 – 64 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Denning, J.H., and Carswell, J.**, 1981, Improvements in rolled asphalt surfacings by the addition of sulphur, Transport and Road Research Laboratory Report No: 963.
- De Bats F., and Hofstra A.**, 1975, Waxy bitumens, Shell Bitumen Review 51.
- Edwards Y., and Redelius P.**, 2003, Rheological effects of waxes in bitumen, Energy & Fuels, 17: 511-520 pp.
- Fritsche H.**, 1994, Zur Bestimmung des Paraffingehaltes in Bitumen, Bitumen, Heft 4, 176-178 pp.
- Dinç, E.**, 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyle, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
- Fortier, R., and Vinson, T.S.**, 1998, Low – temperature cracking and aging performance of modified asphalt concrete specimens. Transportation Research Record, 1630: 77 – 86 pp.
- Francken, L.**, 1998, Bituminous Binders And Mixes, Rilem Reports, 1 – 33 pp.
- Gawel I., and Czechowski F.**, 1997, Study of saturated components in asphalt, Petroleum Science and Technology, 15: 729-742 pp.
- Gawel I., and Czechowski F.**, 1998, Wax content of bitumens and its composition, Erdöl Erdgas Kohle, Heft 10, 507-509 pp.
- Karayol Genel Müdürlüğü**, 2004, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı, K.G.M. Yayınları, Ankara, 3. s.
- Karayol Genel Müdürlüğü**, 2002, Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi, K.G.M. Yayınları, Ankara, 11 s.
- Kennedy, T.W., Roberts, F.L., and Lee, K.W.**, 1982, Evaluation of asphalt mixtures using the freeze – thaw pedestal test, Association of Asphalt Paving Technologists., 51: 327 – 341 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., and Moulthrop, J.S.**, 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- Khattak, M.J., and Baladi, G.Y.**, 1998, Engineering properties of polymer – modified asphalt mixtures. Transportatiton Research Record, 1638: 12 – 22 pp.
- Krom C.J.**, 1968, Determination of wax content of bitumen, Journal of the Institute of Petroleum, No: 536, 232-240 pp.
- Kuloğlu,N.**, 2000, Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreler, TÜBİTAK, 61 – 67. s.
- Lavin, P.G.**, 2003, Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
- Lu X., Soenen H., and Redelius P.**, 2004, Impact of bitumen wax on asphalt performance – Low temperature cracking, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, report No: 50.
- Monishmith, C.L. and Tayebalı, A.A.**, 1988, Behaviour of mixes containing a conventional and a polymer modified asphalts, University of California at Berkeley.
- Mazumdar, M., and Rao, S.K.**, 1993, Effect of flyash on engineering properties of sand – asphalt – sulfur paving mixes, Transportatiton Research Record, 1417: 144 – 149 pp.
- McKay J.F., Branthaver J.F., and Robertson R.E.**, 1995, Isolation of waxes from asphalts and the influence of waxes on asphalt rheological properties, Division of Petroleum Chemistry, American Chemical Society 210th national meeting, Chicago, August 20-25.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- McGennis, R.B., Shuler, S., and Bahia, H.U.**, 1994, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No: FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104 p.
- Mózes G.** (editor), 1982, Paraffin products: properties, technologies, applications, Elsevier Company, Amsterdam-Oxford-New York.
- Musser B.J., and Kilpatrick P.K.**, 1998, Molecular characterization of wax isolated from a variety of crude oils, *Energy & Fuels*, 12: 715-725 pp.
- Nicholls, C.**, 1998, Asphalt Surfacing, E & FN Spon, 68 – 79 pp.
- Noel F., and Corbett L.W.**, 1970, A study of the crystalline phases in asphalts, *Journal of the Institute of Petroleum*, 56: 261-268 pp.
- Obertür U.**, 1998, Entwicklung einer optischen Methode zur Bestimmung des Paraffingehalts im Bitumen (Glanzmethode), German, Heft 1, 11-18 pp.
- Petersen, J.C., Robertson, R.E., and Branthaver, J.F., et.al.**, 1994, Binder Characterization and Evaluation, Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 197p.
- Plancher, H., Green, E.L., and Petersen, J.C.**, 1976, Reduction to oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime, *Association of Asphalt Paving Technologists*, Volume 45: 1 – 24 pp.
- Redelius, P., and Nyna's A.B.**, 2004, Personal communication.
- Schnormeier, R.H.**, 1981, Time proves asphalt – rubber seals cost effective, National seminar on asphalt – rubber, San Antonio, Texas.
- Shuler, T.S., and Pavlovich, R.D.**, 1987, Characterization of polymer modified binders, New Mexico State Highway Department, Research Report 52001 – 1F.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- SHRP-A-369, SHRP report A 369**, 1994, Binder Characterization and Evaluation Volume 3: Physical Characterization.
- Solaimanian, M., Kennedy, T.W., and Tripathi, R.**, 1998, Performance characterization of asphalt binders and mixtures modified by waste toner. Transportatiton Research Record, Volume 1638: 120 – 128 pp.
- Soenen H., Ekblad J., Lu X., and Redelius P.**, 2004, Isothermal hardening in bitumen and in asphalt mix, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, report No: 135.
- The Asphalt Institute**, 1996, Superpave Mix Design, Superpave Series No: 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
- The Shell Bitumen Handbook**, Chapter 5, Polymer Modified And Special Bitumens, 61 – 74 pp.
- TS 1081 EN 12591**, 2003, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Kaplama Sınıfı Bitümler – Özellikler, TSE, 1 – 13. s.
- Tunç, A.**, 2004, Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, 352s.
- Tunç, A.**, 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- Türk Standartlar Enstitüsü**, 2003, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini, TS EN 12607-1, Ankara.
- Unterleutner H., Ecker A., and Hartner O.**, 1998, Ermittlung des Gehaltes an Heptan-Unlöslichem und des Paraffingehaltes aus den Ergebnissen der Bitumen analyse mittels DC-FID, German.
- Van Doorn R.**, 2002, Bitumen Group Shell Global Solutions, Petit Couronne, Personal Communication.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yao, Z. and Monishmith, C.L.**, 1986, Behaviour of asphalt mixtures with carbon black reinforcement, Association of Asphalt Paving Technologists., Volume 55: 564 – 585 pp.
- Yildirim, Y., Solaimanian, M., and Kennedy, T.W.**, 2000, Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete, Report No: 1250-5, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, 99p.
- Ylva, E.**, 2008, Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance, 15 – 17 pp.
- Yollar Fenni Şartnamesi**, 1989, K.G.M. Yayınları, Ankara, 258 – 264 s.
- Zaniewski, J., and Viswanathan, A.G.**, 2006, Investigation of Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Concrete, West Virginia University, 87p.
- Zaniewski, J.P., and Pumphrey, M.E.**, 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109p.
- Warren, R.S., McGennis, R.B., and Bahia, H.U.**, 1994, Superpave Asphalt Binder Test Methods an Illustrated Overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No: FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.

## ÖZGEÇMİŞ

Baurzhan KULTAYEV, 1986 yılında Kazakistan Cumhuriyet'inin OKO ilindeki Çimkent şehrinde doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve 10., 11. sınıfları No:2 Alihan BÖKEYHANOV ismindeki orta mektebinde tamamlamıştır.

2004 yılında kazandığı KazKKA (Kazak Ulaşım ve İletişim Akademisi) İnşaat Mühendisliği Fakültesi Demir Yol İnşaatı bölümünden 2008 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Türkiye Cumhuriyet'inin Kazakistan öğrencilerine sunduğu BÖP (Büyük Öğrenci Projesi) adlı programı sayesinde altında Yüksek lisans burs kontenjanını kazanmıştır. 2009 – 2010 okul yılında Ankara Üniversitesi TÖMER (Türkçe Öğretim Merkezi) Bölümünü başarıyla tamamladıktan sonra aynı yıl Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Lisans Üstü Programını kazanarak Yüksek Lisans programına başlamıştır.

**EKLER**

Ek 1 Nominal Boyuta Göre Karışım Gradasyon Limitleri

Ek 2 TCK Polimer Modifiye Bitüm Şartnamesi

Ek 3 Marshall Stabilite Düzeltme Katsayıları

Ek 4 Saf bitüm (B 160/220) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları

Ek 5 Saf bitüm (B+%5FT) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları

Ek 6 Saf bitüm (B+%6PE) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları

**Ek 1. Nominal Boyuta göre Karışım Gradasyon Limitleri**

ELEK BOYUTU mm (No)	37,5 mm. Nominal Boyut				25 mm Nominal Boyut				19 mm Nominal Boyut				12,5 mm Nominal Boyut				9,5 mm Nominal Boyut			
	Kontrol Noktaları		Yasak Bölge sınırı		Kontrol Noktaları		Yasak Bölge sınırı		Kontrol Noktaları		Yasak Bölge sınırı		Kontrol Noktaları		Yasak Bölge sınırı		Kontrol Noktaları		Yasak Bölge sınırı	
	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.	Min.	Mak.
50		100																		
37,5	90	100				100														
25		90			90	100				100										
19						90			90	100				100						
12,5										90			90	100				100		
9,5													90			90	100			
4,75 (No:4)			34,7	34,7			39,5	39,5									90			
2,36 (No:8)	15	41	23,3	27,3		45	26,8	30,8	23	49	34,6	34,6	28	58	39,1	39,1	32	67	47,2	47,2
1,18 (No:16)			15,5	21,5			18,1	24,1			22,3	28,3			25,6	31,6			31,6	37,6
0,600 (No:30)			11,7	15,7			13,6	17,6			16,7	20,7			19,1	23,1			23,5	27,5
0,300 (No:50)			10	10			11,4	11,4			13,7	13,7			15,5	15,5			18,7	18,7
0,150 (No:100)																				
0,075 (No:200)	0	6			1	7			2	8			2	10			2	10		

## Ek 2. TCK Polimer Modifiye Bitüm Şartnamesi

Sıra No	Deney Adı		Standardı	Birimi	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16
1	Penetrasyon (25oC, 100g, 5sn)		TS EN 1426	0,1mm	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
2	Yumuşama Noktası		min. TS EN 1427	oC	52	62	62	62	67	67	67	72
3	Kuvvet Ölçümlü Düktilite (25oC, 5cm/dk)		min. TS EN 13589	J	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
4	Elastik Geri Dönme (25oC)		min. TS EN 13398	%	80	60	70	80	60	70	80	80
5	Parlama Noktası		min. TS EN 2592	oC	220	220	220	220	220	220	220	220
6	Özgül Ağırlık		TS EN 15326	g/cm3	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1
7	Depolama Stabilitesi											
7,1	Yumuşama Noktası Farkı		maks. TS EN 13399	oC	5	5	5	5	5	5	5	5
7,2	Penetrasyon Farkı		maks.	0,1mm	12	12	12	12	12	12	12	12
8	Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ( $G^*/\sin\delta > 1\text{kPa}$ )	Yenilme Sıcaklığı	min. TS EN 14770 AASHTO T315	oC	64	70	70	70	76	76	76	82
9	Dönmeli İnce Film Etüvü Deneyi		TS EN 12607-1									
9,1	Kütle Kaybı		maks.	%	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,5
9,2	Yumuşama Noktası		min.	oC	50	60	60	60	65	65	65	70
9,3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik											
	Artma		maks. TS EN 1427	oC	8	8	8	8	8	8	8	8
	Azalma		min.	oC	5	5	5	5	5	5	5	5
9,4	Kalıcı Penetrasyon		min. TS EN 1426	%	50	50	50	50	45	45	45	40
9,5	Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ( $G^*/\sin\delta > 2,2\text{kPa}$ )	Yenilme Sıcaklığı	min. TS EN 14770 AASHTO T315	oC	64	70	70	70	76	76	76	82
10	RTFOT+PAV ile Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler		TS EN 14769 AASHTO T315									
10,1	Dinamik Kesme Reometresi ( $G^*\sin\delta < 5000\text{kPa}$ )	Yenilme Sıcaklığı	maks. TS EN 14770 AASHTO T315	oC	22	31	28	25	34	31	28	37
10,2	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği ( $S \leq 300\text{ MPa}$ , $m \geq 0,300$ )	Sıcaklık	maks. TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	oC	-18	-6	-12	-18	-6	-12	-18	-6

### Ek 3. Marshall Stabilité Düzeltme Katsayıları

Numune (mm)		Numune (mm)		Numune (mm)		Numune(mm)		Numune (mm)	
Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör	Boyu	Faktör
50.0	1.470	55.3	1.256	60.6	1.079	65.9	0.943	71.2	0.834
50.1	1.467	55.4	1.253	60.7	1.076	66.0	0.940	71.3	0.832
50.2	1.463	55.5	1.250	60.8	1.073	66.1	0.938	71.4	0.830
50.3	1.469	55.6	1.247	60.9	1.070	66.2	0.936	71.5	0.829
50.4	1.456	55.7	1.243	61.0	1.067	66.3	0.934	71.6	0.828
50.5	1.453	55.8	1.239	61.1	1.064	66.4	0.932	71.7	0.826
50.6	1.449	55.9	1.235	61.2	1.062	66.5	0.930	71.8	0.825
50.7	1.446	56.0	1.231	61.3	1.056	66.6	0.927	71.9	0.824
50.8	1.442	56.1	1.228	61.4	1.053	66.7	0.925	72.0	0.822
50.9	1.439	56.2	1.224	61.5	1.050	66.8	0.922	72.1	0.821
51.0	1.435	56.3	1.220	61.6	1.047	66.9	0.920	72.2	0.820
51.1	1.432	56.4	1.216	61.7	1.044	67.0	0.918	72.3	0.817
51.2	1.428	56.5	1.214	61.8	1.040	67.1	0.915	72.4	0.816
51.3	1.425	56.6	1.210	61.9	1.038	67.2	0.913	72.5	0.815
51.4	1.421	56.7	1.206	62.0	1.036	67.3	0.911	72.6	0.814
51.5	1.418	56.8	1.202	62.1	1.033	67.4	0.908	72.7	0.812
51.6	1.414	56.9	1.198	62.2	1.032	67.5	0.906	72.8	0.811
51.7	1.411	57.0	1.104	62.3	1.031	67.6	0.904	72.9	0.810
51.8	1.497	57.1	1.190	62.4	1.028	67.7	0.901	73.0	0.809
51.9	1.404	57.2	1.187	62.5	1.026	67.8	0.899	73.1	0.808
52.0	1.400	57.3	1.184	62.6	1.023	67.9	0.897	73.2	0.806
52.1	1.207	57.4	1.181	62.7	1.021	68.0	0.894	73.3	0.804
52.2	1.293	57.5	1.178	62.8	1.018	68.1	0.892	73.4	0.802
52.3	1.390	57.6	1.175	62.9	1.016	68.2	0.890	73.5	0.800
52.4	1.382	57.7	1.172	63.0	1.013	68.3	0.888	73.6	0.799
52.5	1.375	57.8	1.169	63.1	1.011	68.4	0.886	73.7	0.797
52.6	1.368	57.9	1.164	63.2	1.008	68.5	0.885	73.8	0.795
52.7	1.359	58.0	1.161	63.3	1.006	68.6	0.883	73.9	0.794
52.8	1.351	58.1	1.158	63.4	1.003	68.7	0.881	74.0	0.792
52.9	1.344	58.2	1.155	63.5	1.000	68.8	0.879	74.1	0.790
53.0	1.337	58.3	1.152	63.6	0.998	68.9	0.877	74.2	0.788
53.1	1.328	58.4	1.149	63.7	0.995	69.0	0.875	74.3	0.786
53.2	1.320	58.5	1.146	63.8	0.992	69.1	0.874	74.4	0.784
53.3	1.317	58.6	1.143	63.9	0.990	69.2	0.872	74.5	0.782
53.4	1.314	58.7	1.140	64.0	0.988	69.3	0.870	74.6	0.780
53.5	1.311	58.8	1.137	64.1	0.985	69.4	0.868	74.7	0.779
53.6	1.306	58.9	1.133	64.2	0.982	69.5	0.866	74.8	0.777
53.7	1.305	59.0	1.130	64.3	0.900	69.6	0.864	74.9	0.776
53.8	1.302	59.1	1.127	64.4	0.978	69.7	0.862	75.0	0.775
53.9	1.299	59.2	1.124	64.5	0.975	69.8	0.860	75.1	0.773
54.0	1.296	59.3	1.120	64.6	0.972	69.9	0.858	75.2	0.772
54.1	1.293	59.4	1.117	64.7	0.970	70.0	0.856	75.3	0.771
54.2	1.290	59.5	1.114	64.8	0.967	70.1	0.854	75.4	0.770
54.3	1.286	59.6	1.110	64.9	0.965	70.2	0.852	75.5	0.769
54.4	1.283	59.7	1.107	65.0	0.962	70.3	0.850	75.6	0.767
54.5	1.280	59.8	1.104	65.1	0.960	70.4	0.849	75.7	0.766
54.6	1.277	59.9	1.100	65.2	0.957	70.5	0.847	75.8	0.765
54.7	1.274	60.0	1.097	65.3	0.955	70.6	0.845	75.9	0.764
54.8	1.271	60.1	1.094	65.4	0.953	70.7	0.843	76.0	0.762
54.9	1.268	60.2	1.090	65.5	0.951	70.8	0.841	76.1	0.761
55.0	1.265	60.3	1.088	65.6	0.494	70.9	0.839	76.2	0.760
55.1	1.262	60.4	1.085	65.7	0.947	71.0	0.837	76.3	0.759
55.2	1.259	60.5	1.082	65.8	0.945	71.1	0.836	76.4	0.785

**Ek 4. Saf bitüm (B 160/220) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları.**

Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B Gr	V cm3	Dp gr/cm3	Dt gr/cm3	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab kg.f	Düz. Fak.	Düz. Stab
	Wa %	Wb, %	gr	1	2	3	Ort													
1	4	3,9	48	65,6	65,9	65,8	65,7	1240,7	716,6	1245,1	528,5	2,3476	2,547	7,89	16,79	52,97	2,68	1233	0,945	1165
2	4	3,9	48	65,6	65,8	65,4	65,6	1240,6	715,5	1244,5	529,0	2,3452					2,76	1155	0,949	1096
3	4	3,9	48	65,2	65,6	65,3	65,3	1242,7	716,3	1246	529,7	2,3460					2,25	1211	0,953	1154
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3463</b>				<b>2,40</b>			<b>1138</b>	
4	4,5	4,3	54	65,0	65,3	65,1	65,1	1246,5	724,4	1249,5	525,1	2,3738	2,529	5,70	15,82	63,96	2,77	1041	0,96	
5	4,5	4,3	54	64,2	64,7	64,2	64,3	1247,4	727,8	1249,6	521,8	2,3906					2,24	1236	0,978	1209
6	4,5	4,3	54	64,1	64,2	65,2	64,5	1253,1	730,8	1255	524,2	2,3905					2,99	1227	0,972	1193
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3850</b>				<b>2,60</b>			<b>1201</b>	
7	5,0	4,8	60	64,2	64,2	64,7	64,4	1254	732,3	1255,7	523,4	2,3959	2,512	4,33	15,59	72,21	3,18	1116	0,9780	1091
8	5,0	4,8	60	63,9	64,0	64,6	64,1	1254,9	734,2	1256,6	522,4	2,4022					3,4	1126	0,9850	1109
9	5,0	4,8	60	64,9	64,0	63,6	64,2	1256,4	736,7	1258	521,3	2,4101					3,21	1112	0,9820	1092
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4027</b>				<b>2,82</b>			<b>1098</b>	
10	5,5	5,2	66	64,9	64,3	64,4	64,5	1258	736,5	1259,8	523,3	2,4040	2,494	3,30	15,68	78,93	4,12	1081	0,9750	1054
11	5,5	5,2	66	64,6	64,6	65,2	64,8	1265,8	742,2	1267,3	525,1	2,4106					4,02	1006	0,9670	973
12	5,5	5,2	66	64,3	64,5	65,2	64,7	1263,3	742,7	1264,6	521,9	2,4206					3,65	1012	0,9700	982
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4027</b>				<b>3,52</b>			<b>1004</b>	
13	6,0	5,7	72	65,4	65	65,0	65,1	1265,1	739,6	1266,8	527,2	2,3997	2,477	3,01	16,40	81,63	6	912	0,96	876
14	6,0	5,7	72	64,7	65,2	65,8	65,2	1269,4	742,8	1271,2	528,4	2,4023					4,53	868	0,957	831
15	6,0	5,7	72	64,9	65,0	65,6	65,1	1267,9	742,4	1269,5	527,1	2,4054					4,4	887	0,96	852
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4025</b>				<b>4,05</b>			<b>853</b>	
B	5,2	4,9	62,4	63,9	64,4	64,8	64,3	1254,0	730,7	1256,3	525,6		2,505	4,16	15,83	73,71	3,54	1137	0,978	1112
B	5,2	4,9	62,4	64,2	64,6	64,8	64,5	1256,6	733,9	1259,0	525,1	2,3931					3,56			
B	5,2	4,9	62,4	64,4	64,9	63,9	64,3	1257,5	737,2	1259,5	522,3	2,4076					3,66	1113	0,978	1089
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4004</b>				<b>2,80</b>			<b>1101</b>	



**Ek 5. Saf bitüm (B+%5FT) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları.**

Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B Gr	V cm3	Dp gr/cm3	Dt gr/cm3	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab kg.f	Düz. Fak.	Düz. Stab
	Wa %	Wb, %	gr	1	2	3	Ort													
1	4	3,9	48	64,5	65,1	65,3	64,9	1239,7	717,7	1244,3	526,6	2,3542	2,547	7,30	16,26	55,08	2,26	1105	0,962	1063
2	4	3,9	48	64,6	64,6	65,0	64,7	1242,5	721,2	1245	523,8	2,3721					2,82	1070	0,97	1038
3	4	3,9	48	65,4	64,9	64,8	65,2	1241,7	718,7	1245,5	526,8	2,3571					3,52	1065	0,957	1019
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3611</b>				<b>2,87</b>			<b>1040</b>	
4	4,5	4,3	54	64,7	64,2	64,2	64,3	1247,4	726,1	1249,2	523,1	2,3846	2,529	5,33	15,49	65,62	2,92	1240	0,978	1213
5	4,5	4,3	54	64,5	64,4	63,7	64,2	1248,2	731	1250,1	519,1	2,4045					4,06	1255	0,982	1232
6	4,5	4,3	54	63,9	64,5	64,3	64,3	1248,6	728,6	1250,3	521,7	2,3933					3,03	1295	0,9	1166
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3942</b>				<b>3,34</b>			<b>1204</b>	
7	5,0	4,8	60	64,5	64,6	64,1	64,4	1250,9	732,5	1252,3	519,8	2,4065	2,511	3,86	15,18	74,60	4,56	1203	0,9780	1177
8	5,0	4,8	60	63,4	64,1	63,4	63,6	1247,4	734,3	1249	514,7	2,4235					3,12	1258	0,9980	1255
9	5,0	4,8	60	64,3	63,3	63,5	63,7	1248,4	732,5	1249,8	517,3	2,4133					3,67	1171	0,9950	1165
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4145</b>				<b>3,78</b>			<b>1199</b>	
10	5,5	5,2	66	64,0	65,1	64,1	64,4	1259,3	737,5	1261,1	523,6	2,4051	2,494	3,34	15,72	78,74	3,61	1052	0,9880	1039
11	5,5	5,2	66	63,8	64,5	64,2	64,2	1258,5	738,1	1260	521,9	2,4114					3,63	1066	0,9820	1047
12	5,5	5,2	66	64,8	64,4	64,6	64,6	1261	740,5	1262,7	522,2	2,4148					4,17	1069	0,9720	1039
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4104</b>				<b>3,93</b>			<b>1039</b>	
13	6,0	5,7	72	64,5	65,1	64,8	64,8	1267,2	738,6	1268,7	530,1	2,3905	2,477	3,52	16,85	79,11	4,25	953	0,967	922
14	6,0	5,7	72	64,7	64,7	64,5	64,6	1263,2	735,8	1264,8	529,0	2,3879					3,71	1115	0,972	
15	6,0	5,7	72	64,7	64,2	64,7	64,5	1268,3	739,5	1270,1	530,6	2,3903					6,06	935	0,975	912
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3896</b>				<b>4,14</b>			<b>917</b>	
%5FT	5,0	4,8	60,4	64,3	63,6	64,3	64,1	1247,7	730,1	1249,8	519,7	2,4008	2,510	4,15	15,50	73,22	2,85	1140	0,985	1123
%5FT	5,0	4,8	60,4	64,6	64,0	64,1	64,1	1250,9	734,3	1252,5	518,2	2,4139					3,32	1179	0,985	1161
%5FT	5,0	4,8	60,7	64,5	64,1	64,3	64,3	1255,6	735,2	1257,7	522,5	2,4031					3,51	1133	0,9	
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4059</b>				<b>3,23</b>			<b>1142</b>	



**Ek – 6. Saf bitüm (B+%6PE) kullanılarak hazırlanan numunelerin özgül ağırlık ve Marshall deney sonuçları.**

Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B Gr	V cm3	Dp gr/cm3	Dt gr/cm3	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab kg.f	Düz. Fak.	Düz. Stab
	Wa %	Wb, %	gr	1	2	3	Ort													
1	4	3,9	48	64,8	64,9	65,2	64,9	1236,6	715,5	1239,7	524,2	2,3590	2,547	7,89	16,79	52,97	1,97	1033	0,968	1000
2	4	3,9	48	64,9	64,4	64,2	64,5	1242,3	722,5	1245,7	523,2	2,3744					2,83	1002	0,975	977
3	4	3,9	48	64,9	64,5	65,2	64,9	1241	716,2	1244,3	528,1						2,32	1043	0,965	1007
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3667</b>				<b>2,37</b>			<b>995</b>	
4	4,5	4,3	54	64,9	65,3	64,6	64,9	1254	730	1256,2	526,2	2,3831	2,547	7,09	16,06	55,84	2,3	1140	0,965	1100
5	4,5	4,3	54	65,2	65,0	64,1	64,8	1247	726,6	1249,6	523,0	2,3843					2,52	1083	0,967	1047
6	4,5	4,3	54	64,3	65,2	64,3	64,6	1247,5	726,5	1249,7	523,2	2,3844					2,45	1081	0,972	1051
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,3839</b>				<b>2,42</b>			<b>1066</b>	
7	5,0	4,8	60	63,8	64,6	64,5	64,3	1253	734,2	1254,8	520,6	2,4068	2,529	5,74	15,85	63,79	2,41	1225	0,9000	1103
8	5,0	4,8	60	64,3	64,6	65,7	64,9	1254,9	736,3	1256,3	520,0	2,4133					2,57	1153	0,9650	1113
9	5,0	4,8	60	63,8	64,6	64,5	64,3	1252,6	734,6	1254,3	519,7	2,4102					2,33	1214	0,9000	1093
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4101</b>				<b>2,44</b>			<b>1103</b>	
10	5,5	5,2	66	64,5	65,3	64,2	64,7	1259,1	739,4	1260,2	520,8	2,4176	2,512	4,04	15,33	73,65	3,27	1040	0,9670	1006
11	5,5	5,2	66	63,8	64,4	64,8	64,3	1260,7	740,8	1262	521,2	2,4188					3,15	1061	0,9000	955
12	5,5	5,2	66	64,1	64,7	63,8	64,2	1259,9	740,8	1261	520,2	2,4220					3,24	1024	0,9820	1006
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4195</b>				<b>3,22</b>			<b>989</b>	
13	6,0	5,7	72	64,4	64,2	64,5	64,4	1256,8	736,2	1258	521,8	2,4086	2,494	2,99	15,41	80,58	3,61	941	0,978	920
14	6,0	5,7	72	64,8	64,7	64,4	64,6	1265,1	741,8	1266	524,2	2,4134					3,15	990	0,972	962
15	6,0	5,7	72	65,3	65,7	64,8	65,3	1263,9	740,7	1265	524,3	2,4106					5,32	882	0,9	
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4109</b>				<b>4,03</b>			<b>941</b>	
%6PE	5,2	4,9	62,4	63,3	63,6	64,1	63,7	1253,8	738,4	1255,1	516,7	2,4266	2,477	2,67	16,10	83,40	2,82	1132	1,006	1139
%6PE	5,2	4,9	62,4	63,9	64,4	64,2	64,2	1257,2	739,2	1258,8	519,6	2,4196					3,44	1146	0,982	1125
%6PE	5,2	4,9	62,4	64,3	65,1	64,4	64,6	1259,3	738,5	1261,1	522,6	2,4097					3,62	1006	0,972	
<b>ORTALAMALAR</b>												<b>2,4186</b>				<b>3,29</b>			<b>1132</b>	