

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARI KÖKENLİ BALMUMU VE BOR OKSİTİN BİTÜMÜN FİZİKSEL VE
REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Neslihan ŞAHAN

ARALIK 2021
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARI KÖKENLİ BALMUMU VE BOR OKSİTİN BİTÜMÜN FİZİKSEL VE
REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

İnş. Müh. Neslihan ŞAHAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 12 / 2021
Tezin Savunma Tarihi : 27 / 12 / 2021**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Lisans eğitimim itibari ile her daim yanımda olan, beni destekleyen, çalışmalarımda bana yol gösteren ve akademisyen olmama vesile olan kıymetli Hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ'a üzerimdeki bütün emekleri için sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamda katkı maddelerinin üretimi, bitüm modifikasyonunda kullanılması ve deney sonuçlarının yapısal aydınlatmasında çok büyük emeği olan KTÜ Kimya Bölümü Öğretim Üyesi değerli hocam Prof. Dr. Kemal SANCAK'a saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Labaratuvarlarının kapısını bana açarak çalışmamın yürütülmesinde büyük emek gösteren Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi değerli hocam sayın Prof. Dr. Baha Vural KÖK'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü personellerinden şube müdürü İnş. Yük. Müh. Muhammet KOMUT'a, Bitümlü bağlayıcılar şefi İnş. Müh. Tuğba ÖZTÜRK'e ve bütün labaratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmam süresince labaratuvar çalışmalarındaki yardımlarından ve desteklerinden dolayı meslektaşlarım Arş. Gör. Erman ÇAVDAR'a, Arş. Gör. Hacer Yeşilçiçek'e ve Arş. Gör. Merve Gülfer BOZDEMİR'e teşekkür ederim. Çalışma süresince yardım ve destekleri sebebiyle meslektaşım Arş. Gör. Aytuğ KUMANDAŞ'a yakın arkadaşım Bilgisayar Müh. Merve Nur TEKE'ye ve adını yazamadığım bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemi sağlayan, hayatım boyunca hep yanımda olan ve bana güç veren babam Mehmet Salih ŞAHAN ve annem Feride ŞAHAN başta olmak üzere bütün aileme minnet ve şükranlarımı sunar, bu çalışmamın yeni çalışmalara ışık tutmasını ve bilim dünyasına katkı sağlamasını temenni ederim.

Neslihan ŞAHAN
Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Arı Kökenli Balmumu ve Bor Oksitin Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/ yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/12/2021

Neslihan ŞAHAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konunun Özgeçmişi	2
1.3. Bitüm	16
1.3.1. Bitümün Kimyasal Yapısı	17
1.3.2. Bitümün Reolojik Yapısı	17
1.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar	17
1.4.1. Bitümlü Sıcak Karışım Kusurları	19
1.4.1.1. Deformasyonlar	19
1.4.1.1.1. Tekerlek İzi.....	20
1.4.1.1.2. Oturmalar ve Çökmeler	22
1.4.1.1.3. Ondülasyonlar ve Kabarmalar	23
1.4.1.2. Ayrışmalar	24
1.4.1.2.2. Sökülmeler.....	25
1.4.1.3. Çatlaklar.....	26
1.4.1.3.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)	26
1.4.1.3.2. Düşük Isı Çatlakları	28
1.4.1.3.3. Diğer Çatlaklar.....	28
1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	29
1.5.1. Geleneksel Bitüm Deneyleri.....	30
1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi	30
1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi	31
1.5.1.3. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi.....	32

1.5.1.4.	Düktilite Deneyi.....	33
1.5.1.5.	Özgöl Ağırlık Deneyi	34
1.5.1.6.	Frass Kırılma Noktası Deneyi	34
1.5.1.7.	Çözünürlük Deneyi	34
1.5.1.8.	İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)	35
1.5.2.	Superpave Bitüm Deneyleri.....	35
1.5.2.1.	Dönel Viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) Deneyi	35
1.5.2.2.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)	36
1.5.2.3.	Basınçlı Yaşlandırma Kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) Deneyi	37
1.5.2.4.	Dinamik Kayma Reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) Deneyi.....	38
1.5.2.5.	Kiriş Eğme Reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) Deneyi	40
1.6.	Bitüm Modifikasyonu	40
1.6.1.	Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Malzemeleri	41
1.7.	Arı Kökenli Organik Balmumu	42
1.8.	Bor	43
1.9.	Yapısal Analiz	46
1.9.1.	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)	46
2.1.	Modifiye Bitümün Hazırlanması	48
2.2.	Deneyisel Çalışmalar	50
2.2.1.	FT-IR Analizinin Yapılışı.....	50
2.2.2.	Penetrasyon Deneyinin Yapılışı	50
2.2.3.	Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı	52
2.2.4.	Parlama ve Yanma Noktası Deneyinin Yapılışı	52
2.2.5.	Düktilite Deneyinin Yapılışı.....	53
2.2.6.	Nicholson Soyulma Deneyinin Yapılışı	54
2.2.7.	Özgöl Ağırlık Deneyinin Yapılışı.....	55
2.2.8.	Trikloretilende Çözünürlük Deneyinin Yapılışı	56
2.2.9.	Dönel Viskozite (RV) Deneyinin Yapılışı.....	57
2.2.10.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyinin (RTFOT) Yapılışı.....	58
2.2.11.	PAV Deneyinin Yapılışı	59
2.2.12.	DSR Deneyinin Yapılışı	59
2.2.13.	BBR Deneyinin Yapılışı	60

3.	BULGULAR.....	62
3.2.	Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	65
3.3.	Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	67
3.4.	Düktilite Deneyi Sonuçları	69
3.5.	Trikloretilende Çözünürlük Deneyi Sonuçları.....	71
3.6.	Parlama ve Yanma Deneyi Sonuçları	72
3.7.	Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	73
3.8.	Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	77
3.9.	RV Deneyi Sonuçları	78
3.10.	RTFOT Sonuçları	83
3.11.	DSR Deneyi Sonuçları.....	86
3.11.1.	Yaşlandırılmamış Bağlayıcılara Ait DSR sonuçları	86
3.11.2.	Kısa Dönemli Yaşlanma Sonrası DSR Sonuçları	94
3.11.3.	PAV Sonrası DSR Sonuçları	100
3.12.	BBR Deneyi Sonuçları	102
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	105
5.	KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ARI KÖKENLİ BALMUMU VE BOR OKSİTİN BİTÜMÜN FİZİKSEL VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Neslihan ŞAHAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2021, 115 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, arı kökenli balmumu ve bor oksitin bitüm modifikasyonunda kullanılabilirliği ve bitümün yapısal, fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla balmumu ve bor oksit saf bitüme farklı oranlarda ayrı ayrı ve birlikte eklenmiştir. Yapılan modifikasyonların saf bitümün yapısal özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için saf ve modifiye bitümlere FT-IR analizi yapılmıştır. Fiziksel ve reolojik özellikleri belirlemek için ise penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık, trikloretilende çözünürlük, duktilite, parlama ve yanma noktası, Nicholson soyulma, dönel viskozimetre (RV), dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabini (PAV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneylerinden faydalanılmıştır. Deneyler sonucunda, balmumunun bitümün işlenebilirliğini arttırdığı ve bor oksitin ise bitümün yüksek sıcaklık performansını geliştirdiği belirlenmiştir. Balmumu ve bor oksit aynı oranlarda birlikte kullanıldığında ise, bitümün işlenebilirliği azalmadan yüksek sıcaklık performansı iyileşmiştir. Bu nedenle, bitüm modifikasyonunda balmumu ve bor oksitin aynı oranlarda birlikte kullanımının çevreye verilen zararı arttırmadan tekerlek izi direncini geliştirebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca balmumu ve bor oksitin bitüm modifikasyonunda birlikte kullanımının bitümün soyulma direncinde çok etkili bir iyileşme sağladığı kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arı kökenli balmumu, Bor oksit, Bitüm, Bitüm modifikasyonu, Tekerlek izi

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF BEESWAX AND BORON OXIDE ON THE PHYSICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMEN

Neslihan ŞAHAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2021, 115 Pages

In this thesis, the usability of beeswax and boron oxide in bitumen modification and their effects on the structural, physical and rheological properties of bitumen were investigated. For this purpose, beeswax and boron oxide were added to the base bitumen separately and together at different rates. In order to examine the effect of the modifications on the structural properties of base bitumen, FT-IR analysis was performed. In order to determine the physical and rheological properties, penetration, softening point, specific gravity, solubility in trichloroethylene, ductility, flash and burning point, Nicholson stripping, rotational viscometer (RV), rolling thin film oven (RTFOT), pressure aging vessel (PAV), dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) tests were used. As a result of the experiments, it was determined that the wax increased the workability of the bitumen and the boron oxide improved the high temperature performance of the bitumen. When beeswax and boron oxide are used together in the same proportions, the high temperature performance is improved without decreasing the workability of the bitumen. Therefore, it has been concluded that the use of beeswax and boron oxide in the same proportions in bitumen modification can improve rutting resistance without increasing environmental damage. It has also been noted that the combined use of beeswax and boron oxide in bitumen modification provides a very effective improvement in the stripping resistance of bitumen.

Key Words: Beeswax, Boron oxide, Bitumen, Bitumen modification, Rutting

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Ham petrolden bitüm elde etme işlemi	16
Şekil 2.	BSK'larla inşa edilen üstyapılarda uygulanan tabakalar.....	18
Şekil 3.	Kaplamada oluşan tekerlek izi	20
Şekil 4.	Yapısal tekerlek izi.....	21
Şekil 5.	Akma tekerlek izi	22
Şekil 6.	Aşınma ve oturma tekerlek izi	22
Şekil 7.	Kaplamada oluşan (a) oturma ve (b) çökme	23
Şekil 8.	Kaplamada oluşan ondülasyon.....	24
Şekil 9.	Kaplamada oluşan kabarma	24
Şekil 10.	Kaplamada oluşan yansıma çatlakları	26
Şekil 11.	Kaplamada oluşan timsah sırtı çatlakları	27
Şekil 12.	Kaplamada oluşan düşük ısı çatlağı	28
Şekil 13.	Kaplamada oluşan kenar çatlakları	29
Şekil 14.	Kaplamada oluşan kayma çatlağı.....	29
Şekil 15.	Penetrasyon deney aleti.....	31
Şekil 16.	Yumuşama noktası deney aparatları	32
Şekil 17.	Cleveland parlama noktası cihazı.....	33
Şekil 18.	Dönel viskozimetre deney cihazı	36
Şekil 19.	RTFOT deney cihazı	37
Şekil 20.	PAV Deney cihazı.....	38
Şekil 21.	DSR deneyi plakaları ve salınım döngüsü	39
Şekil 22.	Bitümün viskoelastik davranışı	39
Şekil 23.	Balmumu	43
Şekil 24.	Bor madeni	44
Şekil 25.	Dünyada bor rezervlerinin yoğun olduğu bölgeler	44
Şekil 26.	Türkiyede bor rezervlerinin yoğun olduğu yerler	45
Şekil 27.	50/70 penetrasyonlu bitüm	48
Şekil 28.	Arındırılmış Balmumu katkısı.....	48
Şekil 29.	Bor oksit katkısı	49
Şekil 30.	Modifiye bitümlerin hazırlanması	49
Şekil 31.	Su banyosunda bekletilmekte olan bitüm numuneleri	51

Şekil 32.	Penetrasyon iğnesinin numune yüzeyine indirilmesi	51
Şekil 33.	(A) bitüm ile doldurulmuş yüzükler (B) tıraşlanmış numuneler.....	52
Şekil 34.	Bitümde (A) parlama ve (B) yanmanın ilk görüldüğü an	53
Şekil 35.	Düktilite deneyine tabi tutulan numuneler	54
Şekil 36.	100 gr agregası alınması	55
Şekil 37.	Petri kabına aktarılmış agregası-bitüm karışımı	55
Şekil 38.	Su dolu piknometre ve yarısı bitüm dolu piknometre tartımları	56
Şekil 39.	RV deney sistemi	58
Şekil 40.	RTFOT cihazına yerleştirilmiş bitüm numuneleri	59
Şekil 41.	DSR deneyi için hazırlanan numuneler.....	60
Şekil 42.	(A) Bitüm ile doldurulmuş BBR kalıpları, (B) Tıraşlanmış BBR numuneleri.....	61
Şekil 43.	Saf bitüme ait FT-IR spektrumu.....	62
Şekil 44.	Balmumuna ait FT-IR spektrumu	62
Şekil 45.	Saf ve balmumu modifiyeli bitümlere ait FT-IR spektrumları	63
Şekil 46.	Bor oksite ait FT-IR spektrumu	64
Şekil 47.	3BO modifiye bitüme ait FT-IR spektrumu	64
Şekil 48.	3BO+3BM modifiye bitüme ait FT-IR spektrumu	65
Şekil 49.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait penetrasyon deneyi sonuçları	66
Şekil 50.	Bor oksit içeren bitümlere ait penetrasyon deneyi sonuçları	66
Şekil 51.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait yumuşama noktası deneyi sonuçları	67
Şekil 52.	Bor oksit içeren bitümlere ait yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	68
Şekil 53.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait penetrasyon indeksleri	69
Şekil 54.	Bor oksit içeren bitümlere ait penetrasyon indeksleri	69
Şekil 55.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait düktilite deneyi sonuçları	70
Şekil 56.	Bor oksit içeren bitümlere ait düktilite deneyi sonuçları	70
Şekil 57.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait çözünürlük deneyi sonuçları.....	71
Şekil 58.	Bor oksit içeren bitümlere ait çözünürlük deneyi sonuçları.....	71
Şekil 59.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait parlama noktası deneyi sonuçları	72
Şekil 60.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait yanma noktası deneyi sonuçları.....	73
Şekil 61.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait parlama ve yanma noktası deneyi sonuçları	73
Şekil 62.	Soyulma deneyi sonrası balmumu modifiyeli bitümlere ait görüntüler	74
Şekil 63.	Soyulma deneyi sonrası bor oksit içeren bitümlere ait görüntüler.....	75

Şekil 64.	Balmumu ve bor oksitin soyulma direnci üzerindeki etkilerinin kıyaslanması.....	75
Şekil 65.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait Nicholson soyulma deneyi sonuçları.....	76
Şekil 66.	Bor oksit içeren bitümlere ait Nicholson soyulma deneyi sonuçları.....	77
Şekil 67.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait özgül ağırlık deneyi sonuçları	77
Şekil 68.	Balmumu modifiyeli bitümlere 120, 135, 165 ve 180 °C’de uygulanan RV deneyi sonuçları	79
Şekil 69.	Bor oksit içeren bitümlere 120, 135, 165 ve 180 °C’de uygulanan RV deneyi sonuçları.....	79
Şekil 70.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait sıcaklık-viskozite grafiği	80
Şekil 71.	Bor oksit içeren bitümlere ait sıcaklık-viskozite grafiği	80
Şekil 72.	Balmumu modifiyeli bitümlerin ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	81
Şekil 73.	Bor oksit içeren bitümlerin ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	82
Şekil 74.	Balmumu modifiyeli bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıpları.....	83
Şekil 75.	Bor oksit içeren bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıpları	84
Şekil 76.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri	85
Şekil 77.	Bor oksit içeren bitümlere ait RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri.....	85
Şekil 78.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait kalıcı penetrasyon yüzdeleri	86
Şekil 79.	Bor oksit içeren bitümlere ait kalıcı penetrasyon yüzdeleri	86
Şekil 80.	Balmumu modifiyeli bitümlerin kompleks kayma modülleri	89
Şekil 81.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait faz açıları	89
Şekil 82.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri	90
Şekil 83.	Bor oksit modifiyeli kompleks kayma modülleri.....	90
Şekil 84.	Bor oksit içeren bitümlere ait faz açıları	91
Şekil 85.	Bor oksit modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri	91
Şekil 86.	Balmumu modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları	93
Şekil 87.	Bor oksit içeren bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları	93
Şekil 88.	RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait kompleks kayma modülleri.....	96
Şekil 89.	RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait faz açıları	97
Şekil 90.	RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait kompleks modülleri	97

Şekil 91.	RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait faz açıları	98
Şekil 92.	RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri.....	98
Şekil 93.	RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait tekerlek izi parametreleri.....	99
Şekil 94.	Balmumu modifiyeli bitümlerin RTFOT sonrası yüksek sıcaklık performans sınıfları	99
Şekil 95.	Bor oksit içeren bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları	100
Şekil 96.	PAV ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait G^* . $\sin \delta$ değerleri.....	102
Şekil 97.	PAV ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait G^* . $\sin \delta$ değerleri.....	102
Şekil 98.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait sünme rijitliği değerleri	104
Şekil 99.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait m-değerleri (sünme oranları).....	104

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Bitümde modifiyer olarak kullanılan katkı maddelerinin sınıflandırılması.....	41
Tablo 2.	Balmumu içerisindeki bileşenler ve oranları.....	43
Tablo 3.	Ticari önemi bulunan bor mineralleri ve bileşikleri.....	45
Tablo 4.	Bor oksitin üretim reaksiyonları.....	46
Tablo 5.	Numune içeriğine göre numune kodları.....	50
Tablo 6.	Balmumu modifiyeli bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları	76
Tablo 7.	Bor oksit içeren bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları	76
Tablo 8.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait RV deneyi sonuçları, cP	78
Tablo 9.	Bor oksit içeren bitümlere ait RV deneyi sonuçları, cP	78
Tablo 10.	Balmumu modifiyeli bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	81
Tablo 11.	Bor oksit içeren bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	81
Tablo 12.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları	87
Tablo 13.	Bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları	87
Tablo 14.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait yüksek sıcaklık performans sınıfları	92
Tablo 15.	Bor oksit içeren bitümlere ait yüksek sıcaklık performans sınıfları.....	93
Tablo 16.	RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları.....	95
Tablo 17.	RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları	95
Tablo 18.	PAV ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları	100
Tablo 19.	PAV ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları	101
Tablo 20.	Balmumu modifiyeli bitümlere ait BBR deneyi sonuçları.....	103

SEMBOLLER DİZİNİ

AH	: Aromatik Hidrokarbon
APA	: Asfalt Kaplama Analizi
APAO	: Amorf Poli Alfa Olefin
BA	: Borik Asit
BBR	: Kiriş Eğme Reometresi
BM	: Balmumu
BO	: Bor Oksit
BP	: Boraks Pentahidrat
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CBE	: Siklit Borat Ester
cm	: Santimetre
CR	: Kauçuk kırıntısı
CRM	: Kauçuk kırıntısı modifiyeri
CS	: Kimyasal yüzey aktif madde bazlı
dk	: Dakika
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
dmm	: Desimilimetre
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DSR	: Dinamik Kayma Reometresi
E*	: Dinamik modül
EBS	: Etilen-Bis-Stearamid
EVA	: Etilen Vinil Asetat
FT	: Fisher Tropsch
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
G*	: Kompleks kayma modülü
gr	: Gram
HMA	: Geleneksel Sıcak Karışım
IDT	: Dolaylı Çekme Testi
Jnr	: Geri Kazanılamayan Sünme Uyumu
kPa	: Kilopascal
LAS	: Lineer Genlik Taraması
m	: Sünme Oranı

MBOC	: Melas Bazlı Bor Oksit
Mpa	: Megapascal
MSCR	: Çoklu Gerilmeli Sünme-Geri Kazanım
MW	: Montan Wax
NRL	: Doğal Kauçuk Lateks
NW	: Doğal bitüm mumu içermeyen bitüm
°C	: Santigrat derece
ÖAB	: Öğütülmüş atık bor
Pa	: Pascal
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabini
PE	: Polietilen
Pen25	: 25 °C'deki penetrasyon değeri
PI	: Penetrasyon indeksi
PPA	: Polifosforik Asit
PVC	: Polvinil Klorür
PW	: Polietilen Wax
Rec	: Geri kazanım
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
RPPW	: Geri dönüştürülmüş polietilenden elde edilen bir tür polirize mum
RTFO	: Dönel İnce Film Halinde Isıtma
RTFOT	: Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
RV	: Dönel viskozimetre
S	: Sasobit
S	: Sünme rijitliği
SB	: Susuz Boraks
SBR	: Stiren Bütadien Kauçuğu
SBS	: Stiren-Bütadien-Stiren
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHRP	: Stratejik Karayolu Araştırma Programı
SIS	: Stiren-İzopren-Stiren
sn	: Saniye
SPT	: Basit bir performans testi
TFOT	: İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
TRLPD	: Üç Eksenli Tekrarlanan Yük Kalıcı Deformasyon
TSR	: Çekme mukavemeti oranı

TSRST	: Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi
WB	: Su bazlı
WLC	: LEADCAPE katkılı ılık karışım
WSA	: Sasobit katkılı ılık karışım
XRD	: X-Işınları Kırınım Yöntemi
YN	: Yumuşama noktası değeri
δ	: Faz açısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hem ekonomik hem de sosyal, kültürel ve siyasi gelişmenin temelinde ulaştırma bulunmaktadır. Bir toplumda ulaştırma imkanları ne kadar yaygın, konforlu ve etkin ise toplumun sosyal hareketliliği de o kadar hızlı olur. Sosyal ve ekonomik kalkınma sosyal hareketliliğe sosyal hareketlilik ise ulaştırma altyapısına bağlıdır.

Ulaştırma, altyapısına göre türlere ayrılmakta ancak kapıdan kapıya aktarmasız taşımacılık sağlayan tek ulaştırma türü olması sebebi ile karayolu taşımacılığı bütün dünyada büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple karayollarının yapımı, bilgi, tecrübe, titizlik ve disiplin gerektiren çok önemli bir husustur [1].

Ülkemizde karayolları, üstyapısı inşa edilirken kullanılan malzemelerin kolaylıkla temin edilebilmesi ve inşası tamamlandıktan sonra kısa sürede trafiğe açılabilmesi sebebi ile esnek kaplamalı olarak yapılmaktadır. Esnek kaplama tabakası, trafiğin doğrudan temas ettiği ve bu nedenle araç tekerleklerine düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak güvenli ve konforlu bir sürüşten birinci derecede sorumlu olan üstyapı tabakasıdır. Yol üstyapısında gerilmelere en fazla maruz kalan kaplama tabakası, üzerine etkiyen yüklere karşı yeterince direnç göstererek bu yükleri herhangi bir bozulmaya maruz kalmadan alt tabakalara aktarabilecek, olumsuz iklim şartlarında kararlılığını muhafaza edecek, altyapıya su geçişine engel olacak, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş sağlayacak niteliklere sahip olmalıdır [2].

Asfalt kaplamalar dünyada ve son zamanlarda ülkemizde yaygın olarak kullanılan bitümlü sıcak karışımlar (BSK) ile inşa edilen esnek kaplama türüdür. Asfalt kaplamalar ağırlıkça %4-6 oranında bitüm ve %94-96 oranında agrega içerirler. Düşük oranda kullanılsa da bitümün kaplama maliyeti ve performansı üzerindeki etkisi büyüktür [3].

Dünya genelinde geçmişten bugüne yükselen yaşam standartları, artan nüfus miktarı ve ekonomik kalkınma beraberinde trafik hacim ve yüklerinde de bir artış meydana getirmiştir. Trafik hacim ve yükleri, iklim şartları vb. çevre koşulları, yol inşası sırasında meydana gelen üretim hataları, yetersiz bakım gibi faktörler asfalt kaplamalarda bozulmalara sebep olmaktadır. Bu bozulmalar yolun konforunu ve hizmet ömrünü azaltmaktadır. Bu sebeple yolda beklenen zamandan önce bakım-onarım çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ulaşımın yaklaşık %90'ının karayolu ile gerçekleştirildiği ülkemizde yolun

proje ömrü dolmadan yapılan bakım-onarım çalışmalarının maliyeti yolun yapım maliyetinden daha masraflı hale gelmiştir. Bu durum ülke ekonomisi için çok büyük bir kayıp olup, bu kayıpları en aza indirmek için alınan önlemlerden bir tanesi de asfalt kaplamaların özelliklerini iyileştirmektir.

Asfalt kaplamaların özelliklerini iyileştirerek deformasyonlara karşı direncini arttırmak için bir takım katkı maddeleri ile bitümlü bağlayıcı veya karışım modifiye edilmektedir. Bitümün karışım performansı üzerindeki etkisinin büyük olması sebebi ile genellikle bitüm modifikasyonu tercih edilmektedir. Uzun yıllardır bir takım katkı maddeleri bu amaçla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ise daha önce literatürde yapılan çalışmalarda bitümde katkı malzemesi olarak kullanımına rastlanmayan arı kökenli balmumu ve bor oksitin bitümün fiziksel, reolojik ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan ön denemelerin ardından elde edilen olumlu bulgular nedeniyle kapsamlı çalışmaya karar verilmiştir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme balmumu ve bor oksit ayrı ayrı ve birlikte farklı oranlarda eklenmiştir. Katkı maddeleri, saf ve modifiye bitümlerin kimyasal özelliklerini tanımak ve katkıların bitümde kimyasal bir farklılaşmaya sebep olup olmadığını gözlemlemek için hazırlanan numunelere FT-IR analizi yapılmıştır. Numunelerin fiziksel ve reolojik özelliklerini incelemek için ise numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama ve yanma noktası, özgül ağırlık, trikloretilende çözünürlük, Nicholson soyulma, dönel viskozimetre (RV), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabini (PAV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmış, kapsamlı ve titizlikle yürütülen deneysel çalışma sonunda balmumunun bitümün işlenebilirliğini arttırdığı ve bor oksitin ise özellikle bitümün yüksek sıcaklık performansını geliştirdiği kaydedilen tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

1.2. Konunun Özgeçmişi

Bu çalışmada modifiyer olarak kullanılan katkıların ilki arı kökenli balmumudur. Bitüm modifikasyonunda mumların kullanımı çok yeni olmamakla birlikte literatür araştırmasında erişilen kaynaklar içerisinde arı kökenli balmumunun bitümde modifiyer olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu bölümde öncelikle arı kökenli balmumu ile benzer nitelikli çeşitli mumlarla (waxlarla) yapılan çalışmalar kronolojik olarak sıralanarak özetlenmiştir. Bazı çalışmalarda mumlar saf bitüm ile

kullanılırken bazılarında mumlar modifiye bitümlere eklenmiştir. Birtakım çalışmalarda ise mumların bitüm üzerindeki etkileri birbiri ile veya bazı polimerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan bir diğer katkı ise bor oksittir. Bu bölümde ikinci olarak bor oksit ve diğer bor mineral ve bileşikleri ile yapılan çalışmalar kronolojik olarak sıralanarak özetlenmiştir.

- Çeşitli mumlar kullanılarak yapılan çalışmalar;

Edwards vd. [4] yaptıkları çalışmada penetrasyon sınıfı 160/220 olan üç farklı bitümü sasobit (S), polietilen wax (PW), montan wax (MW) ve polifosforik asit (PPA) katkıları ile modifiye ederek katkıların bitümün düşük sıcaklık performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Saf bitüme ticari mumlar bitüm ağırlığının %3 ve %6'sı oranlarında eklenirken, polifosforik asit %0.4 ve %1 oranlarında eklenmiştir. Fiziksel ve reolojik özelliklerini incelemek için saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, frass kırılma, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), RTFOT, PAV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından hareketle bitümün reolojik özelliklerinin bitümü modifiye etmek için kullanılan katkı türü ve miktarının yanı sıra bitümün kendisine de büyük ölçüde bağlı olduğu vurgulanmıştır. Düşük sıcaklıklarda sasobitin bitümün sertliğini arttırdığı ancak PPA veya PW eklenmesi ile bitümün daha az sertlik gösterdiği ifade edilmiştir. Özellikle 160/220 penetrasyon sınıfındaki mumsu olmayan bitüme PPA veya PW eklenmesi ile bitümün düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerinde birtakım iyileşmeler görüldüğü belirtilmiştir.

Edwards vd. [5] çalışmalarında FT parafin ve polietilen mum ile doğal bitüm mumu içermeyen (NW) ve farklı oranlarda bitüm mumu içeren (WB ve ME) 160/220 penetrasyonlu üç farklı bitümü modifiye etmişlerdir. Bitümlere ağırlıklarının %6'sı oranında FT parafin ve polietilen mum ayrı ayrı ilave edilmiş ve bitümlü karışımların orta ve düşük sıcaklık performansı incelenmiştir. Hazırlanan numunelere kompleks modülü, dinamik sünme ve ölçülü gerilme testi (TSRST) uygulanmıştır. Bağlayıcı testlerinden elde edilen sonuçlarda katkıların bitümün fiziksel sertliğini önemli derecede arttırdığı görülmüş ancak bu durum TSRST sonuçlarına yansımamıştır. Bunun nedeninin bitümde düşük sıcaklıklarda görülen fiziksel sertleşmenin karışımın çatlama özelliğini büyük ölçüde etkilemeyeceği ya da bu etkiyi gözlemlemek için TRST'nin uygun bir yöntem olmadığı düşünülmüştür. Dinamik sünme testi sonuçlarında en düşük gerilmeler tekerlek izi direnci en yüksek olan FT parafin mumu ile modifiye edilen NW bitümlerde oluşmuştur. Kompleks modülü testlerinde ise her iki katkının da bitümlü karışımın kompleks modülünü arttırdığı ve faz açısını azalttığı

görülmüş olup bunun FT parafin içeren bitümlü karışımlarda daha belirgin olduğu ifade edilmiştir.

Taşdemir [6] penetrasyon sınıfı 50/70 ve 160/220 olan iki farklı bitüme FT parafin ve polietilen mum ekleyerek bu katkıların bitüm ve bitümlü karışımların yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Saf bitümlere ağırlıklarının %3 ve %6'sı oranında katkılar eklenerek bitümler modifiye edilmiştir. Hazırlanan numunelere geleneksel bitüm deneyleri, dinamik mekanik analiz (DMA), BBR ve Fransız tekerlek izi testi uygulanmıştır. Test sonuçları her iki katkının da bitümlü karışımların tekerlek izine karşı direncini arttırdığını göstermiş ve en yüksek tekerlek izi direnci FT parafin modifiyeli asfalt karışımlarda görülmüştür. DMA bakımından en yüksek sertlik polietilen mum ile modifiye edilmiş bağlayıcılarda görülmüş ancak bu etki asfalt karışım testleri ile doğrulanamamıştır.

Merusi vd. [7] parafinik ve poliamidik olmak üzere iki sentetik mumun asfalt karışımların nem duyarlılığı ve soyulma direnci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Penetrasyon sınıfı 50/70 olan bitüme ağırlığının %6'sı oranında mumlar ayrı ayrı eklenerek bitüm modifikasyonu yapılmıştır. Hazırlanan asfalt karışımlara geleneksel dolaylı çekme testi (IDT) ve temas açısı ve adezyon testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, mumların asfalt karışımların soyulma direnci üzerinde iyileştirici bir etkisi olduğu ve en iyi direncin poliamidik mum ile modifiye edilen bitüm varlığında gösterildiği belirtilmiştir.

Liu vd. [8] yaptıkları çalışmada PG 58-28 sınıfı asfalt bağlayıcıyı ağırlığının %0.8, %1.5 ve %3'ü oranında sasobit ile modifiye etmişlerdir. Sasobitin bitümlü bağlayıcı ve karışım üzerindeki etkilerini APA, SPT, IDT ve TSR testleri ile incelemişlerdir. Test sonuçlarından yola çıkarak sasobitin karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını önemli derecede düşürdüğünü, katkı miktarının artışıyla tekerlek izi direncinin arttığını ancak sasobitin nem hassasiyeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Shang vd. [9] çalışmalarında geri dönüştürülmüş polietilenden elde edilen bir tür polirize mum (RPPW) ile penetrasyon derecesi 70 olan saf bitümü ve SBS modifiyeli bitümü modifiye etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları, sasobit ile modifiye ettikleri bağlayıcılar ile karşılaştırmışlardır. RPPW bitüm ağırlığının %1, %3, %5 ve %7'si oranında kullanılırken sasobit %3 oranında kullanılmıştır. Yapılan modifikasyonların etkisini görebilmek için numunelere dönel viskozimetre, sıcaklık taraması, DSC, penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RTFO, yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesi ve optik mikroskopi testleri uygulanmıştır. RPPW'nin viskozite azaltıcı etkisinin SBS ile modifiye edilen bağlayıcıda çok daha belirgin ve sasobitten daha yüksek olduğu görülmüştür. RPPW eklenmesinin asfalt

viskozitesinin sıcaklık hassasiyetini azalttığı, SBS modifiyeli bitümde sıcaklık hassasiyeti bakımından RPPW'nin sasobitten daha iyi sonuçlar verdiği ancak saf bitümde sasobitin daha etkin olduğu ifade edilmiştir. RPPW eklenmesinin saf ve SBS modifiyeli her iki bağlayıcının da penetrasyon değerlerini azalttığı, yumuşama noktası değerlerini ve penetrasyon indekslerini arttırdığı belirtilmiştir. RPPW katkısı saf bitümün uzayabilme yeteneği üzerinde neredeyse hiç etki göstermemiş ancak SBS modifiyeli bağlayıcının RTFOT öncesi düktilite değerlerini bir miktar arttırırken, RTFOT sonrası numunelerde bu değeri azaltmıştır. RPPW, SBS modifiyeli bağlayıcının depolama stabilitesini ihmal edilebilir düzeyde olumsuz etkilemiş, tekerlek izi direnci bakımından hem saf hem de modifiye bağlayıcıda kompleks modülünü arttırıp, faz açısını azaltmıştır. Bu durumun RPPW'nin asfalt bağlayıcısındaki jel veya ağ yapısında bir tür kristal oluşturabileceğinin göstergesi olduğu ifade edilmiştir.

Zhao ve Guo [10] çalışmalarında sasobitin asfalt karışımın işlenebilirlik performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Karışıma SBS modifiyeli bitüm ağırlığının %2'si oranında sasobit eklemişlerdir. Karışıma işlenebilirlik testi uygulamışlardır. Sonuç olarak sasobit katkılı ılık karışım asfaltın 145 °C sıcaklıkta sahip olduğu işlenebilirlik ile sıcak karışım asfaltın 175°C sıcaklıkta sahip olduğu işlenebilirlik değerinin eşdeğer olduğunu belirlemişlerdir.

Banerjee vd. [11] çalışmalarında uzun dönemli yaşlanmanın sasobit, rediset, evotherm ve cecabase katkılı ılık karışım asfalt bağlayıcılar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kontrol bağlayıcılarının kısa dönemli yaşlanması RTFOT ile 163°C sıcaklıkta yapılırken ılık katkılı bağlayıcıların kısa dönemli yaşlanması 143°C sıcaklıkta yapılmıştır. Uzun dönemli yaşlanma için ise hem kontrol hem de ılık karışım bağlayıcılar, 60 °C sıcaklıkta bir çevre odasına yerleştirilmiş tavalarda içerisinde yaşlandırılmıştır. Bu bağlayıcılara 0, 2, 5, 11, 22, 35, 67 ve 132 günlük periyotlarda reolojik testler uygulanmıştır. Sonuç olarak dört katkının da bitümde zaman içerisinde meydana gelen yaşlanma hızını azalttığı belirlenmiştir.

Zhao vd. [12] çalışmalarında ılık karışım katkı maddeleri ile modifiye edilmiş asfalt karışımların tekerlek izi performansını incelemek için iki mum ve iki kimyasal katkı kullanmışlardır. Mumlar asfalt bağlayıcı ağırlığının %1.5'i oranında kullanırken kimyasal katkı maddeleri bağlayıcı ağırlığının %0.3 ve %0.5'i oranlarında kullanılmıştır. Saf ve modifiye karışımlara APA ve DSR testleri uygulanmıştır. Mumların karışımların tekerlek izi direncini arttırdığı ve kimyasal katkı maddeleri eklenen bağlayıcıların ise kontrol numunelerine benzer sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Yang vd. [13] çalışmalarında polietilen mum bazlı organik bir katkı olan LEADCAP ile hazırladıkları ılık karışımı (WLC) sasobit katkılı ılık karışım (WSA) ve geleneksel sıcak karışım (HMA) ile kıyaslamışlardır. Bütün karışımlarda PG 64-22 bitüm kullanılmış ve Suparpave karışım dizaynı yapılmıştır. LEADCAP ve sasobit bitüm ağırlığının %1.5'i oranında kullanılmıştır. Karışımların nem hassasiyetini ölçmek için TSR deneyi, soyulma direncini belirlemek için ise dinamik daldırma deneyi yapılmıştır. Ayrıca lineer viskoelastik özelliği karakterize etmek için dinamik modül (E^*) testi, yorulma performansını değerlendirmek için döngüsel yorulma testi ve tekerlek izi direncini değerlendirmek için üç eksenli tekrarlanan yük kalıcı deformasyon (TRLPD) testi yapılmıştır. TSR sonuçlarında nem hassasiyetine karşı WLC'nin WSA ve HMA'dan daha iyi direnç gösterdiği görülmüştür. Dinamik modül testi sonuçlarından WLC ve HMA'nın benzer davranış gösterdiği ve WSA'nın bütün frekans değerlerinde daha yüksek sertlik gösterdiği görülmüştür. Bu durumun genellikle ısı çatlaklarına karşı daha az direncin, tekerlek izine karşı ise daha iyi direncin göstergesi olduğu belirtilmiştir. Yorulma performansı bakımından WLC, WSA'dan daha iyi davranış sergilemekle birlikte HMA en iyi sonucu vermiştir. WLC, TRLPD testinde en iyi tekerlek izi performansını göstermiştir. Bu durumun WSA ve HMA'nın optimum asfalt içeriği yakinken WLC'nin asfalt içeriğinin daha az olmasından kaynaklı olabileceği belirtilmiştir.

Das vd. [14] çalışmalarında iki ticari mumun (FT parafin ve Asphaltan B) asfalt karışımların çatlama ve nem hasarı performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Penetrasyon sınıfı 70/100 olan bitüme ağırlığının %4'ü oranında katkılar ayrı ayrı eklenmiştir. Asfalt bağlayıcılara geleneksel bitüm deneyleri, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Asfalt karışımlara ise termal gerilme kısıtlı numune testi (TSRST) ve dolaylı çekme testi (IDT) uygulanmıştır. Sonuç olarak, kontrol karışımına kıyasla modifiye karışımların daha iyi çatlama ve nem hasarı direnci gösterdiği belirtilmiştir. Çatlama direncini arttırmada FT parafinin, nem hasarı direncinde ise Asphaltan B'nin daha etkili olduğu ifade edilmiştir. BBR sonuçlarında FT parafinin çok küçük bir negatif etkisi görülse de TSRST sonuçlarıyla mum içeren karışımların çatlama sıcaklığının kontrol karışımı ile neredeyse aynı olduğu belirtilmiştir.

Yi-qiu vd. [15] sasobitin LH-70, LH-90 ve KLMY-90 olmak üzere üç farklı bitümün özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bitümlere ağırlıklarının %2, %3 ve %4'ü oranlarında sasobit eklemişlerdir. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri uygulanmış ve deney koşulları ile asfaltın performans

göstergeleri arasındaki ilişkiyi araştırmak için korelasyon analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, sasobit ilavesinin bitümün sıcaklık duyarlılığı ve tekerlek izi direncini iyileştirebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, istatistik analiz sonucunda sasobitin bitümün faz açısı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ifade edilmiştir.

Rodriguez-Alloza vd. [16] çalışmalarında dört farklı ılık karışım katkısının kauçuk ile modifiye edilmiş bitüm üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Modifiye bitüme Sasobit, Asphaltan A (linyit veya kahverengi kömürden elde edilen bir montan mumu), Asphaltan B (bir yağ asidi amidi ile karıştırılmış rafine bir montan mumu) ve Licomont BS 100 (aminlerin yağ asitleri ile reaksiyona sokulması ile sentetik olarak üretilen bir mum) katkılarını ayrı ayrı %2 ve %4 oranlarında eklemişlerdir. Numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, RV, düktilite ve elastik geri kazanım testleri uygulanmıştır. Bütün katkıların modifiye bitümün yumuşama noktası değerini arttırdığı, penetrasyon ve viskozite değerini azalttığı belirlenmiştir. Düktilite deneyinde kauçuk parçacıklarının oluşturduğu heterojenlik sebebi ile erken kırılmaların olduğu, katkıların net bir etkisinin görülemediği ifade edilmiştir. Bu sonucun düktilite testinin kauçuk modifiyeli bitümler için uygun olmadığını doğrular nitelikte olduğu ifade edilmiştir. Elastik geri kazanım testinin sonucunda ise kauçuğun bitümün elastik geri kazanım özelliğini iyileştirdiği ancak katkıların bu özellik üzerinde ayırt edici bir etkisinin yokmuş gibi görüldüğü belirtilmiştir.

Kök vd. [17] penetrasyon sınıfı 50/70 olan bitüme ağırlığının %2, %3, %4'ü oranlarında sasobit ve SBS katkısını ayrı ayrı ve birlikte eklemişlerdir. Hazırladıkları numunelere geleneksel bitüm deneyleri, DSR ve RV deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçları sasobitin SBS'e kıyasla yumuşama noktası ve PI değerlerini daha fazla arttırdığını göstermiştir. Her iki katkı için de katkı oranı arttıkça tekerlek izi parametresi önemli ölçüde artmış ancak en iyi iyileşme SBS katkısı ile olmuştur. Her iki katkı birlikte kullanıldığında ise sasobitin SBS modifikasyonunun esnekliğini arttırdığı ifade edilmiştir. Viskozite açısından ise yalnızca SBS kullanımında katkı miktarının artışıyla viskozite katlanarak artmış, sasobit kullanımında katkı artışıyla doğrusal olarak azalmıştır. Her iki katkı birlikte kullanıldığında sasobitin, SBS modifikasyonun viskozitesinin üstel artışını doğrusal artışa değiştirdiği ve böylece karışımın karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir.

Kheradmand vd. [18] çalışmalarında 60/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1.5, ve %3.5'i oranında sasobit ekleyerek sasobitin yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kontrol numunesi ve

modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri uygulanmış ve FTIR analizi yapılmıştır. Sonuçlar sasobit katkısının artışıyla birlikte bitümlerin yumuşama noktası değerinin arttığını, penetrasyon değeri ve viskozite değerinin azaldığını göstermiştir. Frekans tarama testinde katkı oranının artışıyla faz açılarında azalma ve kompleks modülü değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu sonucun modifiye bitümlerin saf bitümlere oranla daha elastik davranış sergilediğinin ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda daha fazla tekerlek izi direncine sahip olduğunun göstergesi olduğu ifade edilmiştir.

Kim vd. [19] yaptıkları çalışmada ağırlığının %10'u oranında kauçuk kırıntısı (CRM) ile modifiye edilmiş PG 64-22 sınıfı iki farklı bitüme bağlayıcı ağırlığının %1.5, %2.5, %3.5 ve %4.5'i oranında FT parafin mumu eklemişlerdir. Mum içeren ve içermeyen CRM modifiye bitümlere RV, RTFO, PAV, DSR ve BBR deneyi uygulamışlardır. RV deneyi sonucunda mum ilavesi ile CRM modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. DSR deneyi sonucunda genel olarak mum içeren CRM modifiye bitümlerin mum içermeyen CRM modifiye bitümlere göre daha yüksek tekerlek izi direnci gösterdiği belirtilmiştir. Ancak yorulma direnci bakımından mum katkısındaki artışla yorulma direncinin azaldığı belirtilmiştir. BBR deneyi sonucunda ise FT parafin mumu ilavesi ile CRM modifiye bitümlerin düşük ısı çatlaklarına karşı direncinin azaldığı belirlenmiştir.

Ghuzlan ve Ar'ar [20] çalışmalarında sasobitin asfalt karışımlarda kullanımının karışımın tekerlek izi ve yorulma direnci üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1.5'i oranında sasobit ilave etmişlerdir. Superpave karışım dizaynına göre hazırlanan karışımlara dolaylı çekme ve dinamik sünme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, sasobit modifiyeli karışımların kontrol karışımına göre daha yüksek tekerlek izi direnci ve yorulma direnci gösterdiği ifade edilmiştir.

Feitosa vd. [21] çalışmalarında karnauba mumunun ılık karışım katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. 50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %3 ve %4'ü oranında tip 4 karnauba mumu ekleyerek bitümü modifiye etmişlerdir. Saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR, BBR ve MSCR deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, karnauba mumunun akış iyileştirici bir katkı olarak kullanımının uygun olabileceği ve 70 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı saf bitüme kıyasla modifiye bitümlerin daha yüksek dirence sahip olduğu belirtilmiştir.

Nakhai vd. [22] çalışmalarında penetrasyon sınıfı 60/70 olan bitüme ağırlığının %2 ve %3'ü oranlarında polietilen mum eklemişlerdir. Polietilen mumun ılık karışım asfaltın nem

direnci ve tekerlek izi direnci üzerindeki etkilerini sırası ile dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve dinamik sünme testi ile incelemişlerdir. Sonuç olarak, polietilen mumun düşük sıcaklıklarda sıkıştırılan karışımlarda nem direncini arttırdığı ancak yüksek sıcaklıklarda sıkıştırılan karışımlarda nem direnci üzerinde olumsuz etki gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, polietilen mumun tekerlek izi direnci üzerinde negatif etki gösterdiği ifade edilmiştir.

Mazumder vd. [23] çalışmalarında iki adet ticari mumun PG 64-22 sınıfı saf bitüm ve ağırlığının yaklaşık %3'ü oranında SBS ile modifiye edilmiş PG 76-22 sınıfı bitüm üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Katkı olarak LEADCAP olarak adlandırılan polietilen mum bazlı organik bir katkı ve sasobit kullanılmıştır. Katkılar bitümlere bitüm ağırlığının %1.5'i oranında ilave edilmiştir. Katkıların saf ve modifiye bitümün reolojik özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikleri incelemek için Suparpave bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları bakımından LEADCAP katkısının tekerlek izi direnci bakımından ise sasobitin daha iyileştirici olduğu belirtilmiştir.

Ghuzlan ve Assi [24] çalışmalarında sasobitin asfalt bağlayıcı reolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Penetrasyon sınıfı 60/70 olan bitüme ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında sasobit ekleyerek bitümü modifiye etmişlerdir. Saf ve modifiye bitümlere RV, RTFO, PAV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, sasobitin saf bitümün işlenebilirlik performansını ve tekerlek izi direncini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca asfalt bağlayıcıya eklenecek optimum sasobit oranı %2 olarak seçilmiş ve daha yüksek oranlarda sasobit ilavesinin asfalt bağlayıcının termal çatlaklara karşı performansını olumsuz etkileyeceği ifade edilmiştir.

Zhao vd. [25] çalışmalarında sasobit ve deurex (şeker kamışı mumu) katkılarının amorf poli alfa olefin (APAO) modifiye asfalt üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 60/80 penetrasyonlu bitümü öncelikle ağırlığının %6'sı oranında APAO ile modifiye etmiş ve ardından modifiye bitüme ağırlığının %2, %4 ve %6'sı oranında sasobit ve deurex katkılarını ayrı ayrı eklemişlerdir. Hazırladıkları numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR, BBR deneyleri uygulamış ve FTIR analizi yapmışlardır. Geleneksel bitüm deneylerinde her iki katkının da modifiye bitümün yumuşama noktası değerini arttırdığı, penetrasyon ve düktilite değerlerini azalttığı görülmüştür. RV deneyi sonucunda katkıların modifiye bitümün viskozitesini büyük ölçüde azalttığı belirtilmiştir. DSR deneyi sonucunda her iki katkının da modifiye bitümün tekerlek izi direncini geliştirdiği ancak sasobit modifikasyonunun etkisinin daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. BBR deneyi sonucunda ise bu katkıların nispeten yüksek oranlarda kullanılmasının modifiye bitümün düşük sıcaklık

performansını olumsuz etkilediği ancak düşük oranda deurex içeren modifiye bitümde bir iyileşme olabileceği belirtilmiştir.

Nakhaei vd. [26] yaptıkları çalışmada polietilen (PE) mum ve etilen-bis-stearamid (EBS) mumları ile modifiye edilmiş ılık karışım asfaltın nem direncini incelemişlerdir. Katkılar, PG 64-22 sınıfı bitüme bitüm ağırlığının %2 ve %3'ü oranlarında ayrı ayrı eklenmiştir. Saf ve modifiye bitümlere FTIR analizi ve DSR deneyi uygulanmıştır. Superpave karışım dizaynına göre hazırlanan karışımlara ise karışımların nem duyarlılığını değerlendirmek için modifiye Lottman testi uygulanmıştır. Sonuç olarak EBS katkısının ılık karışımın nem direncini arttırdığı, polietilen mumun ise nem direnci üzerindeki etkisinin sıcaklığa bağlı olduğu ifade edilmiştir.

Ali [27] çalışmasında SBS, SIS ve CRM polimerleri ile modifiye edilmiş PG 64-22 sınıfı bitümlere sasobit ve LEADCAP katkılarını ayrı ayrı eklemiştir. Katkılar ayrıca polimer içermeyen bitümlere de eklenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hazırlanan numunelere RV, DSR, MSCR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. RV deneyi sonuçları her iki katkının da saf ve polimer modifiye bitümlerin viskozite değerlerini azalttığını göstermiştir. BBR deneyi sonucunda LEADCAP katkısının bütün bağlayıcılarda sertlik değerlerini azalttığı, sasobitin ise sertlik değerlerini arttırdığı belirtilmiştir. DSR sonuçlarından hareketle her iki katkının da bütün bağlayıcılarda tekerlek izi direncini arttırdığı ifade edilmiştir. Orta sıcaklıklarda yapılan DSR deneyinde LEADCAP katkısının yorulma çatlaklarına karşı direnci arttırmada faydalı olduğu görülmüştür. MSCR testinde bütün bağlayıcı türleri için katkıların Jnr, %Rec ve %Jnr değerlerinde önemli bir değişime neden olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca MSCR testinin CRM modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi direncini ölçmek için uygun olmadığı ve bunun daha yüksek parçacık boyutu ve kauçuk miktarının diğer modifiyerlerden daha fazla olmasından kaynaklı olabileceği belirtilmiştir.

Yang vd. [28] çalışmalarında 60/80 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1, %3, %5 ve %7'si oranlarında deurex ilave etmişlerdir. Hazırladıkları saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR, BBR ve MSCR deneyleri uygulamış ve FTIR ve DSC analizi yapmışlardır. Geleneksel bitüm deneyleri sonucunda deurex ilavesi ile bitümün yumuşama noktası değerinin arttığı, penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığı ifade edilmiştir. RV deneyi sonuçları deurex ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinin azaldığını göstermiştir. DSR deneyi sonucunda artan deurex içeriği ile bitümün tekerlek izine karşı dayanımının arttığı ancak orta sıcaklıklarda yorulma dayanımında çok az azalma olduğu ifade edilmiştir. Frekans tarama testi sonucundan hareketle farklı trafik

hızlarında da yükler altında deurex modifiye bitümlerin saf bitümden daha iyi tekerlek izi direnci göstereceği belirtilmiştir. MSCR testi sonucunda Deurex ile bitümün kalıcı deformasyonlara karşı direncinin önemli ölçüde artabileceği belirtilmiştir. BBR deneyi sonucunda ise bitüme deurex ilavesi ile saf bitümün düşük ısı çatlaklarına karşı direncinde çok az kötüleşme görülmüş ancak bitümün düşük sıcaklık performans sınıfında bir değişme olmadığı ifade edilmiştir.

Gao vd. [29] çalışmalarında 60/80 penetrasyon sınıfı bitüme ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında sasobit ve deurex katkılarını ayrı ayrı ve birlikte ekleyerek bitümü modifiye etmişlerdir. Saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR deneyleri ve FT-IR analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, her iki katkının da saf bitümün viskozitesini düşürdüğü ve tekerlek izi parametresini arttırdığı belirtilmiştir.

Yang ve Liu [30] çalışmalarında SBS modifiyeli bitüme ağırlığının %2, %3 ve %4'ü oranlarında deurex eklemişlerdir. Deurex içeren ve içermeyen modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR ve BBR deneyleri uygulamışlardır. Geleneksel bitüm deneyleri sonucunda deurex ilavesinin SBS modifiyeli bitümün yumuşama noktası değerini arttırırken penetrasyon ve düktilite değerlerini azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca deurex eklenmesi ile SBS modifiyeli bitümün viskozite değerlerinin azaldığı ifade edilmiştir. DSR ve BBR deneyleri sonucunda ise deurex ilavesi ile SBS modifiyeli bitümün tekerlek izi direncinin arttığı, yorulma direnci ve düşük ısı çatlaklarına karşı direncinin çok az azaldığı belirtilmiştir.

Kataware ve Singh [31] çalışmalarında Fischer Tropsch (FT) mum bazlı, su bazlı (WB) ve kimyasal yüzey aktif madde bazlı (CS) olmak üzere üç farklı ılık karışım katkısının AC-30 sınıfı bağlayıcının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. FT ve CS katkıları bağlayıcı ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında kullanılırken, WB %4, %6 ve %8'i oranlarında kullanılmıştır. Yaşlandırılmamış numunelere FTIR analizi yapıp, RV deneyi uygulanmıştır. TFOT ile yaşlandırılmış numunelere DSR ve MSCR testi uygulanırken PAV yöntemi ile yaşlandırılan numunelere LAS testi uygulanmıştır. RV deneyi sonucunda her üç katkının da asfalt bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını azalttığı belirlenmiştir. DSR deneyi sonucunda yapılan Superpave yüksek sıcaklık sınıflandırmasında WB ve CS katkılarının bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfını değiştirmedeği ancak FT katkısının yüksek sıcaklık performans sınıfını arttırdığı belirtilmiştir. MSCR testinden yola çıkarak WB ve CS katkılarının bağlayıcının tekerlek izi direncini azaltırken FT ilavesinin tekerlek izi direncini iyileştirdiği ifade edilmiştir. LAS

testi sonucunda ise saf bağlayıcıya göre %4 WB ve %1 CS içeren bağlayıcılar ile FT içeren bütün bağlayıcılarda yorulma ömrünün arttığı ifade edilmiştir.

Yang vd. [32] çalışmalarında penetrasyon sınıfı 60/80 olan iki farklı bitüme ve penetrasyon sınıfı 30/60 olan SBS modifiyeli bitüme ağırlıklarının %3'ü oranında sasobit ve deurex katkılarını ayrı ayrı eklemişlerdir. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR deneyleri uygulamış ve XRD analizi yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, deurex ve sasobitin bütün bağlayıcılarda viskozite değerlerini azalttığı ve viskozite üzerindeki etkilerinin neredeyse eşit olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu katkıların bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını önemli ölçüde arttırdığı ancak ara sıcaklıklarda bitümün daha kırılgan olmasına sebep oldukları ifade edilmiştir.

Ameri vd. [33] gevşek mum (slack wax) ve polipropilen mumunun kauçuk kırıntısı (CRM) ile modifiye edilmiş PG 64-22 sınıfı bitümün tekerlek izi ve yorulma performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ağırlığının %15'i oranında kauçuk kırıntısı ile modifiye ettikleri bitüme ağırlığınca %2, %4 ve %6 oranlarında gevşek mum ve polipropilen mumunu ayrı ayrı eklemişlerdir. Tekerlek izi direncini belirlemek için RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere DSR ve MSCR deneyleri uygulanırken, yorulma direncini gözlemlemek için PAV ile yaşlandırılmış numunelere DSR ve LAS deneyleri yapılmıştır. Katkıların modifiye bitümün işlenebilirlik performansına etkisini incelemek için RV deneyi ve asfalt bağlayıcının fonksiyonel gruplarında meydana gelen değişimi görebilmek için FTIR analizi yapılmıştır. Her iki katkı da modifiye bitümün viskozite değerlerini katkı oranları arttıkça azaltmış ve polipropilen mumun etkisi daha yoğun olmuştur. Polipropilen mumu modifiye bitümün yüksek sıcaklık performansını artırırken gevşek mum azaltmıştır. MSCR sonucunda polipropilen mumun modifiye bitümün tekerlek izi direncini arttırdığı ancak katkı oranı arttıkça iyileşme oranının azaldığı görülmüştür. Diğer yandan gevşek mum modifiye bitümün tekerlek izi direncini azaltmış ancak saf bağlayıcı ile kıyaslandığında gevşek mum içeren kauçuk kırıntılı modifiye bağlayıcı daha iyi sonuç vermiştir. LAS testi sonucunda gevşek mumun katkı oranının artışıyla paralel olarak modifiye bağlayıcının yorulma direncinin arttığı ancak polipropilen mumunun yorulma dayanımını azalttığı belirtilmiştir.

Sani vd. [34] çalışmalarında penetrasyon sınıfı 60/70 olan saf bitüme ağırlığının %3 ve %6'sı oranında doğal kauçuk lateks (NRL) ile %0.3 oranında yeni bir mum katkısı olan gripper eklemişlerdir. Saf bitüm ile gripper içeren ve içermeyen NRL-modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, RV, RTFO, PAV, DSR, depolama stabilitesi, burulma geri

kazanım deneyleri uygulanmış ve polarize bir optik mikroskop ile polarize mikrograf görüntüleri incelenmiştir. NRL ile saf bitümün viskozitesinin arttığı ancak gripper eklenmesi ile NRL-modifiye bitümün viskozite değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. NRL içeriğindeki artışla birlikte saf bitümün tekerlek izi performansı arttığı ve gripper ilavesi ile daha da geliştiği ifade edilmiştir. Saf bitüme NRL eklenmesi ile burulma geri kazanım yüzdesinin arttığı ve gripper eklenmesi ile bu yüzdenin daha da arttığı belirtilmiştir. Gripper ilavesi ile NRL-modifiye asfaltın daha iyi depolama uyumluluğu gösterdiği belirlenmiştir. Mikrograf görüntülerinden ise yaşlanmanın ve gripper ilavesinin asfaltın homojenliğini ve birbirine bağlanmasını geliştirdiği belirlenmiştir.

- Bor ve bor kökenli katkı maddeleri kullanılarak yapılan çalışmalar;

Arslan vd. [35] çalışmalarında laboratuvar ortamında organik kökenli kalsiyum bileşiği ve organik kökenli borik asit sentezlemişlerdir. Sentezledikleri bu katkıları 50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1, %2, %3, %5 ve %10'u oranlarında ekleyerek modifiye bitümler elde etmişlerdir. Saf ve modifiye bitümlere yumuşama noktası, düktilite, Nicholson soyulma, Marshall stabilite, BBR ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Dönel viskozimetre deneyi sonuçlarına göre her iki katkı için de optimum katkı oranı %3 olarak belirlenmiştir. Katkıların saf bitümün viskozite ve yumuşama noktası değerlerini düşürürken, düktilite değerlerini arttırdığı ifade edilmiştir. DSR deneyi sonuçlarına göre saf ve modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfının aynı olduğu, BBR deneyi sonuçlarına göre ise saf bitüme kıyasla modifiye bitümlerin daha yüksek çatlama direnci gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca her iki katkının da bitümlü karışımların soyulma direncini, Marshall stabilitesini ve sertlik modülünü iyileştirdiği gözlenmiştir.

Oruç vd. [36] çalışmalarında penetrasyon sınıfı 50/70 olan bitüme ağırlığının %1, %3, %5, %10, %15 ve %20' si oranında borik asit (BA), aromatik hidrokarbon (AH) ve borik asit+aromatik hidrokarbon (BA+AH) ekleyerek bitümü modifiye etmişlerdir. Katkıların saf bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyi uygulanmıştır. Fiziksel özellikler bakımından en iyi sonuçları %3BA+%1AH modifiyeli bitümün verdiği belirtilmiştir.

Arslan vd. [37] çalışmalarında 50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1, %2, %3 ve %5'i oranlarında monoetilen ve dietilen glikol kökenli sentetik poliboron bileşiklerini ayrı ayrı eklemişlerdir. Hazırladıkları saf ve modifiye bitüm numunelerine yumuşama noktası, RV, DSR, BBR, Nicholson soyulma ve Marshall stabilite deneyleri uygulamışlardır.

Marshall deneyi sonuçlarına göre her iki katkının da bitümlü karışımın stabilitesini iyileştirdiği ifade edilmiştir. BBR ve Nicholson soyulma deneyi sonuçlarına göre monoetilen glikol kökenli sentetik poliboronun saf bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına ve soyulmaya karşı direncini arttırdığı ifade edilmiştir. DSR deneyi sonuçlarına göre ise dietilen glikol kökenli sentetik poliboronun saf bitümün tekerlek izine karşı direncini arttırdığı belirtilmiştir.

Selman [38] çalışmasında bor atığının (tinkal) bitümlü sıcak karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bitümlü karışıma ağırlının %4, %5, %6, %7 ve %8'i oranlarında öğütölüp fiiler malzemesi haline getirilen bor atığı eklenerek bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Kontrol numunesi olarak ise %6 oranında kireçtaşı katkılı mineral filler eklenerek hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri kullanılmıştır. Numunelere Marshall stabilite ve akma deneyi, dolaylı çekme- rijitlik modölü deneyi, mekanik Marshall batırma deneyi, donma-çözölme çevriminden sonra Marshall stabilite ve akma deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından hareketle bor atığının bitümlü sıcak karışımların aşınma tabakasında filler malzemesi olarak kullanılabileceğı ifade edilmiştir.

Oruç vd. [39] çalışmalarında laboratuvar ortamında sentezledikleri bor içerikli dört farklı katkı maddesi ile 50/70 penetrasyonlu saf bitümü modifiye etmişlerdir. Katkılar saf bitüme ağırlığının %1'i oranında ayrı ayrı eklenmiştir. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR deneyleri uygulanmış ve FT-IR ve SEM analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarından hareketle katkıların saf bitümün tekerlek izi direncini ve elastik özelliklerini iyileştirdiğı ifade edilmiştir. Ayrıca saf bitüme kıyasla en iyi iyileşmenin sülfirik asit katalizörlüğünde sentezlenen bor içerikli katkı maddesi ile modifiye edilmiş bitümde göröldüğü ifade edilmiştir.

Oruç ve Yılmaz [40] çalışmalarında laboratuvar ortamında, siklit borat ester (CBE) adı verilen bor içerikli yeni bir katkı maddesi sentezlemişlerdir. Katkı maddesi 50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlığının %1, %2, %4 ve %6'sı oranında eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, parlama noktası, frass kırılma noktası, RV, RTFOT, PAV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, katkı maddesinin saf bitümün tekerlek izine ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncini arttırdığı ve en iyi iyileşmenin %6 oranında katkı ilavesi ile göröldüğü ifade edilmiştir.

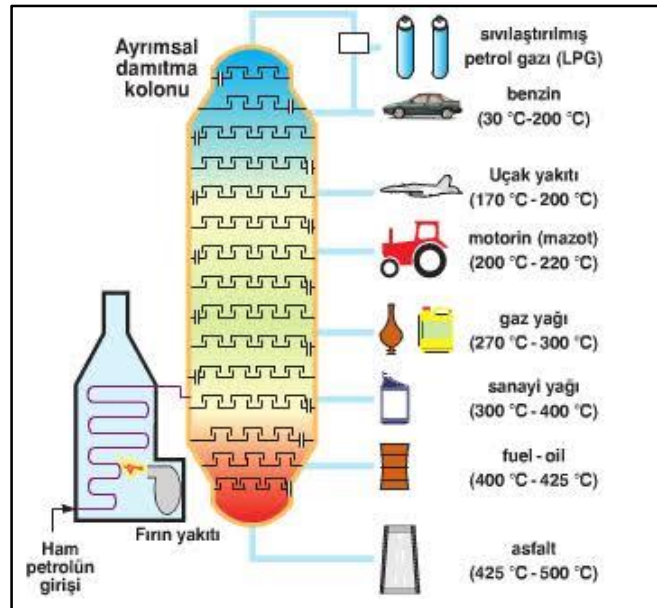
Gürü vd. [41] çalışmalarında ham şekerin rafinasyon işlemi sırasında elde edilen organik bir atık madde olan şeker pancarı melası ile bor oksit ve şeker pancarı melasının laboratuvar koşullarında bir araya getirilmesi ile elde edilen melas bazlı bor oksit (MBOC) ile penetrasyon sınıfı 50/70 olan saf bitümü modifiye etmişlerdir. Saf bitüme ağırlığının %1-10'u arasında değişen oranlarda şeker pancarı melası ve MBOC ayrı ayrı eklenmiştir. Hazırladıkları numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR, Nicholson soyulma ve Marshall stabilite deneyleri uygulamışlardır. Nicholson soyulma ve Marshall stabilite deneyi sonuçlarına göre MBOC eklenmesi ile bitümlü karışımların performansı artarken, şeker pancarı melası katkısı eklenmesi ile bitümlü karışımların performansında bir değişme olmamıştır. %10 oranında MBOC eklenmesi ile saf bitümün tekerlek izine ve yorulmaya karşı direncinde iyileşme görüldüğü ifade edilmiştir. %5 oranında şeker pancarı melası eklenmesi ile saf bitümün tekerlek izi direncinin azaldığı ancak yorulma direncinin arttığı belirtilmiştir.

Keskin ve Karacasu [42] çalışmalarında atık bor maddelerin asfalt betonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bitümlü karışımda kullanılacak filler ve 1.18 mm'lik elekten geçen ince malzemenin yerine farklı oranlarda boraks pentahidrat (BP), susuz boraks (SB) ve öğütülmüş atık bor (ÖAB) bor kullanılmıştır. Boraks pentahidrat ve susuz boraks ince ve filler malzemenin %5 ve %10'u yerine kullanılırken öğütülmüş atık bor %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Marshall tasarımına göre hazırlanan numunelere Marshall tasarım deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, üç katkının da kullanımında gerekli şartname kriterlerinin sağlandığı vurgulanmıştır.

Şahin [43] çalışmasında sülfirik asit katalizörlüğünde borik asit ve aspir yağını laboratuvar koşullarında kimyasal olarak karıştırarak yeni bir katkı maddesi sentezlemiştir. Sentezlenen katkı maddesi penetrasyon sınıfı 50/70 olan saf bitüme ağırlığının %0.3, %0.5, %0.7 ve %1'i oranında eklenerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bitümlere geleneksel bitüm deneyleri, RV, RTFOT ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından hareketle katkı maddesinin saf bitümün işlenebilirliğini, uzayabilme kabiliyetini, yaşlanmaya ve tekerlek izine karşı direncini iyileştirdiği ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı ifade edilmiştir.

1.3. Bitüm

Bitüm; doğal kökenli hidrokarbonların veya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya her ikisinin bir kombinasyonu olup katı, yarı katı, sıvı ya da gaz halde bulunabilen, koyu kahve veya siyah renkli, güçlü yapıştırıcı özelliklere sahip olan ve karbondisülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanmıştır. Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılmıştır. Asfaltlar ise kendi içerisinde doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olarak iki türe ayrılmışlardır. Doğal asfaltlar kaya ve göl asfaltı olmak üzere jeolojik kuvvetlerin etkisiyle zaman içerisinde beşeri faktörlerden nispeten bağımsız olarak petrolden oluşan asfaltlardır. Yapay asfaltlar ise doğal asfaltların aksine rafineride ham petrolün damıtılması neticesinde elde edilen asfalt türüdür. Diğer bitümlü bağlayıcı türü olan katranlar ise odun ya da kömürün kuru damıtma adı verilen yöntemle damıtılması sonucu elde edilmektedir. Kuru damıtmada damıtma işlemi klasik damıtma işleminden daha yüksek sıcaklıklarda yapılarak katı maddelerden yoğunlaşabilen gazlar elde edilir. Kömürün karbonizasyonu sonucunda da oluşan gazlar yoğunlaştırıldığında ham katran elde edilmiş olur. Ancak ham katran bu haliyle bünyesinde fazla miktarda su bulundurması ve ince kıvamlı tortulu olması nedeniyle yol kaplamalarında kullanıma uygun değildir. Ham katran yol kaplamalarında arıtıldıktan sonra kullanılır [1, 44].



Şekil 1. Ham petrolden bitüm elde etme işlemi [45]

1.3.1. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitüm, hidrokarbon molekülleri, bu moleküller ile yapısal olarak benzeyen heterosiklik türler, sülfür, nitrojen ve oksijen atomlarını içeren fonksiyonel grupların karmaşık bir kimyasal karışımıdır. Ayrıca bitüm, bir miktar inorganik tuzlar, oksitler veya porfirin yapılar şeklinde demir, nikel, vanadyum, magnezyum ve kalsiyum benzeri metalleri de içermektedir. Kimyasal olarak kompleks bir yapıya sahip olan bitümler yapılarında oransal olarak %82-88 karbon, %8-11 hidrojen, %1-6 sülfür, % 0-1 nitrojen, %0-1,5 oksijen ve eser miktarda metaller veya metal içerikli organik bileşikler bulundurmaktadır [46].

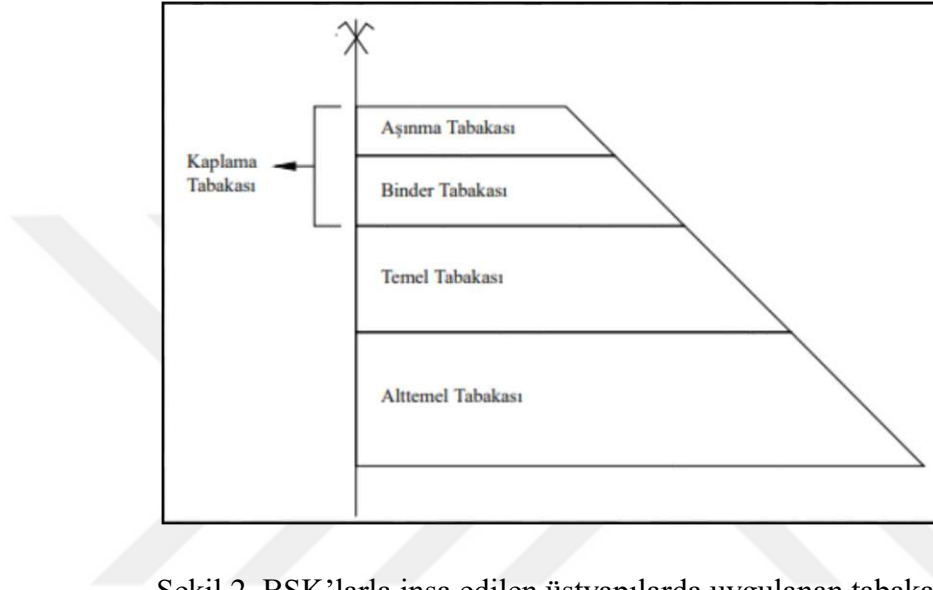
1.3.2. Bitümün Reolojik Yapısı

Reoloji, bir maddede meydana gelen akma ve deformasyonu uygulanan yükün yanı sıra yükün uygulanma süresini de dikkate alarak belirleme ilkesiyle çalışan bir bilim dalıdır. Bitüm reolojisi ise bilinen bir sıcaklık derecesinde bitümün kimyasal bileşenleri ile baskın hidrokarbon yapılarının belirlenmesi ve bileşiminde veya yapısında meydana gelmiş olan değişikliklerin etkilerinin incelenmesidir. Bitüm trafik yükü etkisi altında yükleme süresi, şiddeti ve sıcaklığa bağlı olarak visko-elastik ve termo-plastik özellikler gösteren reolojik bir malzemedir. Bu özellikleri taşıyan malzemeler yüksek yükleme hızlarında elastik, düşük yükleme hızlarında viskoz, orta yükleme hızlarında ise visko-elastik davranış sergilemektedirler. Yine düşük sıcaklıklarda elastik, orta sıcaklıklarda visko-elastik, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış göstermektedirler [47, 48].

1.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Orta ve ağır trafikli yollarda trafik yüklerini taşımak, üstyapı tabakalarını trafiğin yıkıcı etkilerinden, su, iklim ve çevre koşullarının zararlı etkilerinden korumak amacıyla kaplama tabakasında kullanılan malzemeler bitümlü sıcak karışımlar veya sıcak karışım asfaltlar olarak adlandırılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar belli bir gradasyon limitine uygun olarak agregalar ile bitümlü bağlayıcının sıcak olarak bir araya getirilip, bir plentte homojen bir şekilde karıştırılmasıyla elde edilir. Bitümlü sıcak karışımların yola serilip sıkıştırılması ile kaplama tabakası oluşturulmuş olur [44].

Bitümlü sıcak karışımlarla inşa olunan üstyapı tabakalarında kaplama tabakası, genellikle en üstte trafiğin doğrudan temas ettiği aşınma tabakası ve hemen altında ise binder tabakası olmak üzere iki tabaka şeklinde yapılır. Bu iki tabakadan oluşan kaplama tabakasının altında ise temel ve sonrasında da alttemel tabakası bulunur. Bu tabakalar Şekil 2'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2. BSK'larla inşa edilen üstyapılarda uygulanan tabakalar

Alttemel tabakası; incesi az, belirli bir granülometriye sahip granüler malzemenin ince tesviyesi tamamlanmış üstyapı tabanı üzerine projesine uygun bir şekilde serilip sıkıştırılmasıyla elde edilen üstyapı tabakasıdır. Bu tabakanın en önemli görevi ise su ve don etkisine karşı tampon bölge görevi üstlenmesidir [49, 50].

Temel tabakası; alttemel tabakası üzerinde malzemesinin fiziki özellikleri ve granülometrisi alttemel tabakasına kıyasla daha iyi olan doğal kum, kırmataş ya da doğal çakıl ile az da olsa bağlayıcı ince malzeme kullanılarak inşa edilen üstyapı tabakasıdır. Temel tabakası kaplamadan gelen trafik yüklerini alttemel tabakası ile birlikte taban zemini üzerine yayar [49].

Kaplama tabakası ise trafik yüklerine ve çevre şartlarına doğrudan maruz kalan üstyapı tabakasıdır. Asıl görevi araç tekerleklerine düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak olan bu tabaka çoğunlukla aşınma ve binder tabakası olmak üzere iki tabaka halinde inşa edilir.

1.4.1. Bitümlü Sıcak Karışım Kusurları

Bitümlü sıcak karışımlar ile yapılan kaplamalar başlangıçta çok iyi inşa edilmiş olsalar dahi yolun trafiğe açılması sonucu zamanla trafik yüklerinin, çevre ve iklim şartlarının olumsuz etkilerinden kaynaklı birtakım bozulmalara maruz kalmaktadırlar [2]. Ülkemizde ise asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmaların sebepleri olarak tasarım yönteminin ve kullanılacak malzemenin yanlış tercih edilmesi, trafik yüklerinin kontrolsüz ve hızlı olarak artış göstermesi, bakım üniteleri ve diğer ünitelerin arasındaki uyum eksikliği, teknik yönden ve proje bakımından yetersiz altyapı inşaları söylenebilir [51]. Sıcak karışım asfalt kaplamalarda meydana gelen bu bozulmalar ilk yıllarda yavaş ilerlediği için yolun servis kabiliyetini korumak için yalnızca periyodik bakımlar yeterli olmaktadır. Ancak bakım ve iyileştirmeler zamanında yapılmazsa kaplamadaki kusurlar artmakta, maliyeti yüksek bakım ve onarımlara ihtiyaç duyulmaktadır [52]. Bitümlü sıcak karışım kusurları deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlaklar olarak üç başlık altında ele alınmaktadır [53].

1.4.1.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, bitümlü kaplama yapımı tamamlandıktan bir süre sonra meydana gelen sürüş konforu ve güvenliği üzerinde ciddi olumsuz etkileri olan yapısal ve kalıcı bozulmalardır. Deformasyonların oluşmasındaki en genel neden düşük stabiliteli bitümlü sıcak karışımlar kullanılması olsa da;

- Bitüm ve mineral fillerin aşınma tabakasında çok fazla miktarda kullanılması,
- Kaplama tabakalarında sıkıştırma işleminin yetersiz yapılması,
- Kaplama tabakasının altındaki tabakalarda ve taban zemininde meydana gelen büyük hacim değişiklikleri,
- Üstyapı tabaka kalınlıklarının olması gerekenden daha az olması,
- Drenaj işleminin yeterince etkin olmaması da deformasyonlara neden olabilmektedir [54].

1.4.1.1.1. Tekerlek İzi

Tekerlek izi veya oluklanma adı verilen bu bozulma türü asfalt kaplamalarda bilhassa ağır taşıtların geçişine maruz kalan şeritlerin üzerinde ve taşıt tekerleklerinin kaplamaya temas ettiği yerlerde kanal şeklinde meydana gelen deformasyon türüdür [55].

Tekerlek izi oluşumunun başlıca sebepleri;

- Trafik yükünün ağır oluşu,
- Tırmanma şeritleri vb. yerlerde ağır taşıtların yavaş hızla hareket etmesi,
- Sıkıştırma işleminin yetersiz yapılmış olması,
- Zemin dayanımı ve temel tabakası kalınlığının yetersiz oluşu,
- Asfalt ve filler yüzdesinin veya filler/bitüm yüzdesinin gereğinden fazla olması,
- Karışım içerisinde yuvarlak dere malzemesi kullanılmış olması,
- Kullanılan asfaltın viskozitesinin düşük olması,
- Hava sıcaklığının yüksek oluşu,
- Üstyapı tabakaları ve doğal zeminde meydana gelen yanal hareketler,
- Taban zemini ya da alt tabakada oturma gerçekleşmesi,
- Yetersiz drenajdan kaynaklı üstyapı tabanında meydana gelen stabilite kaybı ve taşıma gücü azalması olarak sıralanabilir [52].

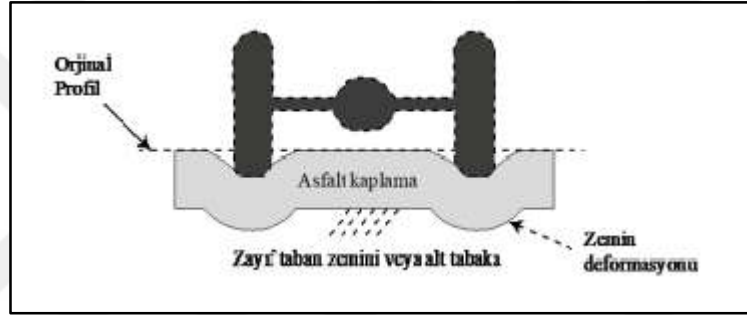


Şekil 3. Kaplamada oluşan tekerlek izi [56]

Farklı sebeplerden kaynaklı olarak oluşan dört çeşit tekerlek izi türünden bahsedebilir.

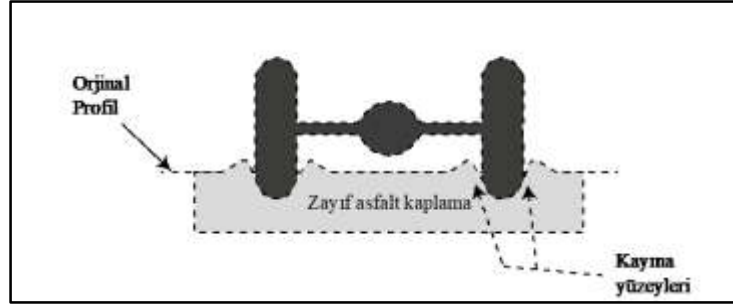
Bunlar oluşum şekillerine göre; yapısal tekerlek izi, aşınma tekerlek izi, oturma tekerlek izi ve de akma tekerlek izi olarak adlandırılmaktadır.

Yapısal tekerlek izi; taban zeminini de kapsayan bitümlü tabakanın altında bulunan tabaka veya tabakaların bünyesinde meydana gelen deformasyonlardan kaynaklı oluşan tekerlek izi türüdür. Etrafında kabarma oluşmayan bu tekerlek izinin sebebi yüklemeler sonucu oluşan gerilmelerin mevcut durumdaki malzemenin dayanımından fazla olmasıdır. Yapısal tekerlek izi çoğunlukla tasarımı trafik şartlarına uygun olarak yapılmayan üstyapılarda meydana gelmekle birlikte kalitesi düşük malzeme kullanmak, kullanılan malzemeyi yetersiz sıkıştırmak, donma-çözülme ve drenaja karşı yeterince önlem almamak da bu deformasyona sebep olabilir [57].



Şekil 4. Yapısal tekerlek izi [57]

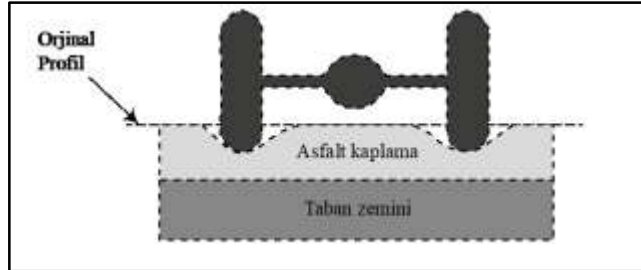
Akma tekerlek izi; çevresinde kabarmaların görüldüğü tekerlek izi türüdür. Bu tip tekerlek izi bitümlü malzemenin dayanımının yükten dolayı oluşan gerilmeleri karşılayamaması nedeniyle bitümlü tabaka ya da tabakaların bünyesinde meydana gelen deformasyonlar sonucu oluşmaktadır. Bu tekerlek izi türü çoğunlukla ağır taşıtların düşük hızlarla hareketine devam ettiği çıkış eğimli bölgelerde, kavşaklar ve kurbalarda, kaplama ve taşıt lastikleri arasında oluşan teğetsel gerilmelerin fazla olduğu yerlerde görülmektedir [57].



Şekil 5. Akma tekerlek izi [57]

Aşınma tekerlek izi; yüzeydeki agregaların aşınması sebebiyle meydana gelen tekerlek izi türü olup yüzeysel tekerlek izlerinden kabul edilir. Çivili tekerleklerin agregaları aşındırması sonucu oluşan bu tekerlek iziyle daha çok çivili tekerleklerin yaygın kullanıldığı kuzey Avrupa ülkelerinde karşılaşılmaktadır [57].

Oturma tekerlek izi; kenarlarında kabarma meydana gelmeyen, şekli aşınma tekerlek izi ile aynı olan yüzeysel tekerlek izi sınıfındaki bir diğer tekerlek izidir. Kaplama tabakasının yetersiz sıkıştırılması sonucu trafik etkisiyle meydana gelen oturmalar sebebi oluşmaktadır [57].



Şekil 6. Aşınma ve oturma tekerlek izi [57]

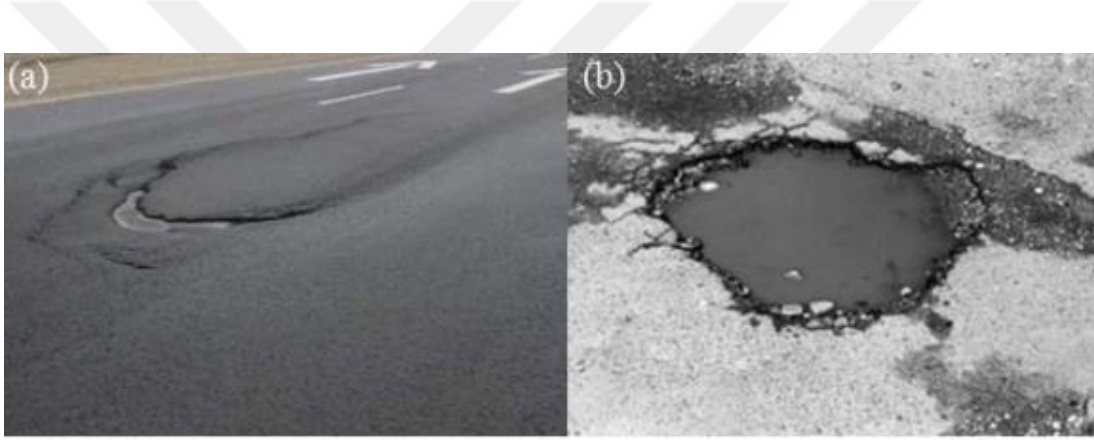
1.4.1.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Bitümlü kaplamaya bağlı olmaksızın, kaplama tabakasının altında bulunan tabakalarda oluşan deformasyonların yol yüzeyine yansması oturma olarak adlandırılmaktadır. Yolun orta çizgisi boyunca veya kenar şeritlerde enlemesine ya da uzunlamasına oluşan bu oturmalar ait oturma eğrisi büyük olduğundan dolayı kaplama esnekliği ile eğrinin şeklini

almaya çalışacak ve böylelikle çatlamayacaktır. Fakat kaplama tabakasının rijitliği fazla ise yeterli esneklik sağlanamayarak çatlama meydana gelebilir. Oturmalarla sebep olarak;

- Yetersiz kalınlığa sahip alt tabakalar,
- Altyapıda meydana gelen oturmalar,
- Banketlerin yetersiz olması,
- Yüksekliği fazla olan yer altı suyu,
- Drenajın iyi olmayışı gösterilebilir [2, 51, 54].

Çökmeler ise orijinal kaplama yüzeyinden daha alçakta bulunan, dairesel çapları 0.5-1.5 m, derinlikleri de 2-5 cm arasında veya daha fazla olabilen, içlerinde su toplanan çukurlar olarak tarif edilmektedir [54].



Şekil 7. Kaplamada oluşan (a) oturma ve (b) çökme [55]

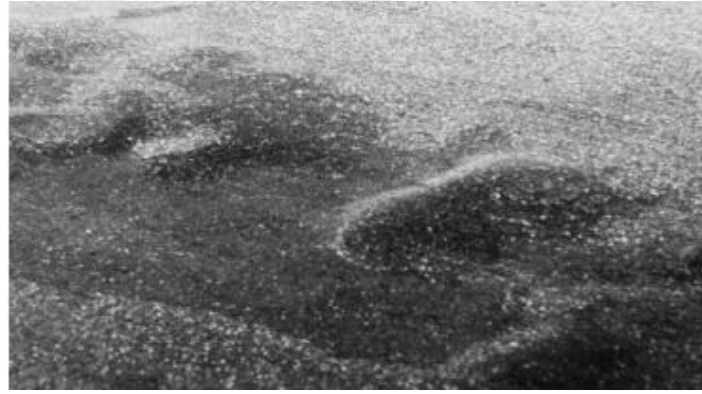
1.4.1.1.3. Ondülasyonlar ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, yetersiz stabiliteye sahip bitümlü sıcak karışımlar ile inşa edilen kaplamalarda trafik akışı ile aynı doğrultuda, dalgalara benzer şekilde meydana gelen deformasyon türüdür. Bunun yanı sıra fazla miktarda bitüm kullanılması, penetrasyonu yüksek bitüm kullanılması ve yetersiz nitelikte binder tabakası inşa edilmiş olması da ondülasyonların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu kusurlar bölgesel olmaları sebebi ile onarılmaları mümkündür [58, 59].



Şekil 8. Kaplamada oluşan ondülasyon [60]

Kabarmalar ise, doğal zeminde ya da üst tabakalarda meydana gelen şişme nedeniyle kaplama tabakasının yukarı yönde lokal olarak yapmış olduğu yer değiştirmelerdir. Doğal zeminde bulunan suyun donma-çözülmesi ve zeminin şişmeye elverişli olmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak ondülasyonlarla aynı sebeplerden oluşmaktadır [2].



Şekil 9. Kaplamada oluşan kabarma [60]

1.4.1.2. Ayrışmalar

İklim ve trafik etkisi ile aşınma tabakasının küçük parçalar şeklinde ayrışmasından kaynaklanan, kopma ve parçalanma olarak görülen bozulmalardır. Bu bozulmalar agrega danelerinin aşınma tabakasından kopup uzaklaşması ile olur. Ayrışmalara sebep olarak;

- İmalat hataları,
- Kalitesi düşük malzeme kullanmak,

- Temiz olmayan ve nemli agregaya kullanmak,
- Serim ve sıkıştırma işlemini uygun şekilde yapmamak,
- Yeterli miktarda bitüm kullanmamak,
- Bitüm-agrega adezyonunun düşük olması gösterilebilir [59].

1.4.1.2.1. Soyulmalar

Soyulmalar, bitümlü bağlayıcı ile agregaya arasında adezyon sağlayan bağların zayıflaması nedeni ile zamanla bitümlü sıcak karışımların yapısında meydana gelen bozulmalardır. Çoğunlukla bitümlü kaplamanın altındaki tabakalardan başlayıp yukarıya doğru devam eden soyulmalar, agregaya danelerini sarmış olan ince asfalt filminin kil, su ve trafiğin mekanik etkisi sebebi ile agregadan ayrılması ve bunun sonucunda agreganın çıplak kalmasıdır. Soyulmayı etkileyen başlıca faktörler, bitümlü bağlayıcı ile agregaların kimyasal ve fiziksel özellikleri, bitümlü bağlayıcı ile agregalar arasındaki adezyon, serme ve sıkıştırma koşulları, yüzeysel drenaj durumu, alt tabakalardaki drenaj durumu ve trafik koşullarıdır. Ancak soyulmayı etkileyen en önemli faktör bitümlü bağlayıcı ile agregaya ara yüzeyinde su ve nem bulunmasıdır. Kuru ve aynı zamanda temiz agregaya kullanmak, bağlayıcılık özelliği yüksek bitüm kullanmak, bitüm oranını yüksek tutmak ve viskozitesi yüksek bitüm kullanmak soyulma miktarını azaltmaktadır [2].

1.4.1.2.2. Sökülmeler

Sökülmeler, agregaya ile bitüm arasındaki bağın yetersizliği sebebi ile agregaların zaman içerisinde yüzeyden koparak ayrılması olarak tarif edilmektedir. Bu bozulma tipinde aşınma tabakası parça parça veya tabaka halinde soyulmaktadır. Sökülmelerde, agregaya daneleri yavaş ve kademeli bir şekilde yüzeyden aşağıya doğru ayrılır. Öncelikle ince malzemeler kopar ve ufak çukurlar oluşur, sonrasında ise aşındırma tesiri ile daha büyük olan parçalar kopar. Sökülmelere;

- Sıkıştırma işleminin yetersiz yapılması,
- Kirli agregaya kullanımı,
- Drenaj koşullarının yetersiz oluşu,
- İmalatın soğuk ve nemli havada yapılması,

- Bitüm miktarının az olması,
- Tabaka kalınlığının yetersiz oluşu,
- Bitümün fazla ısıtılması sebep olmaktadır [59].

1.4.1.3. Çatlaklar

Kaplamanın yüzeyinde trafik, iklim ve çevre koşullarının tesiri ile farklı şekil, derinlik ve genişliklerde meydana gelen kusurlardır. Genel olarak çatlaklar; stabilite çatlakları, yorulma çatlakları ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılmaktadır. Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin tesiri ile kaplama tabakasının altında meydana gelen çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması durumunda oluşmaktadır. Stabilite çatlakları kaplamanın altından başlayıp zaman içerisinde kaplama yüzeyine çıkmaktadır. Yorulma çatlakları, ağır trafik yüklerinin tekerrür etmesi sonucu kaplama tabakasının yorulma mukavemetinin aşılması ile oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulan bir kaplamanın üzerine tekrardan bir kaplama inşa edildiğinde alt tabakada oluşmuş olan çatlakların üst tabakaya ilerlemesi olarak tarif edilmektedir [59].



Şekil 10. Kaplamada oluşan yansıma çatlakları [61]

1.4.1.3.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)

Yorulma çatlakları, bitümlü kaplamaların ağır tekerlek yüklerine tekrarlı olarak maruz kalması nedeni ile kaplamanın sahip olduğu çekme gerilmesi dayanımının çatlak oluşumuna

sebepe olacak derecede aşılması ile oluşur. Yorulma çatlaklarının ön belirtisi trafiğin akış yönünde aralıklı bir şekilde boyuna doğrultuda tekerlek izi çatlaklarının oluşmasıdır. Bu aralıklı boyuna çatlaklar zaman içerisinde birleşir ve enine çatlakların meydana gelmesine neden olur. Bundan dolayı yorulma çatlakları kaplama için artan bozulmalardandır. Bu çatlaklar birbirleri ile bağlantılıdır ve timsah sırtı ya da kümes teli şeklinde olup farklı boyutlarda bloklar halinde kaplamanın belirli kesimlerinde ya da bütün kesiminde meydana gelmektedir. Çatlaklı yapılar, içlerine su alıp hidrostatik basınç ve trafik tesiri ile sökülür ve kaplamanın yüzeyinde yerel çukurlar meydana gelir [2,59].

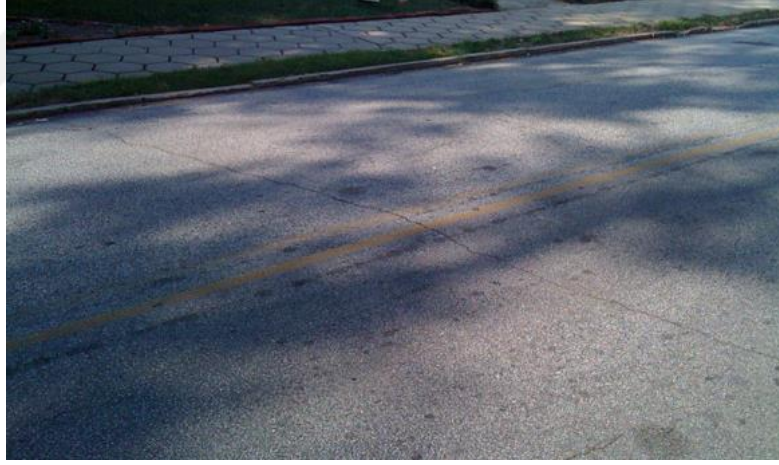
Yorulma çatlakları çoğunlukla dingil yüklerinin ağır olması ve fazla sayıda yük tekrarı, kaplama ya da kaplamanın altında yer alan tabakaların yetersiz kalınlıkta olması, tabakalarda meydana gelen hacim değişiklikleri ve drenajın yetersiz olması gibi sebeplerle oluşur. Bunların yanı sıra, bitümlü tabaka yeterince esnek değilse trafik yükü etkisi altında meydana gelen deformasyonlara yeterli uyum sağlayamaz ve yük tekrarı ile çatlamalar oluşur. Kaplamada meydana gelen yorulma çatlakları çoğu zaman kaplama tabakasının tasarım ömrünün dolduğunu gösterir ve kaplama onarılmaya ihtiyaç duyar. Kaplama tasarım ömrünü tamamlamadan meydana gelen çatlamalar ise kaplamanın maruz kaldığı trafiğin öngörülenden daha fazla olduğunu gösterebilir [2].



Şekil 11. Kaplamada oluşan timsah sırtı çatlakları [61]

1.4.1.3.2. Düşük Isı Çatlakları

Düşük ısı çatlakları, asfalt kaplamanın soğuk iklim şartlarında büzülmesi ile oluşmaktadır. Bir başka ifade ile, bu çatlaklar trafik etkilerinden ziyade iklim şartlarının etkisi ile meydana gelmektedir. Düşük ısı çatlakları trafiğin akış yönüne dik olarak, enine doğrultuda oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar, çoğunlukla bitümlü kaplamanın yüzeyinde meydana gelenler ve kaplamanın bütün kalınlığınca meydana gelenler olarak iki grupta ele alınır. Kaplamanın yüzeyinde görülen kılcal çatlaklar, ısı tesiri ile asfalt bağlayıcının büzülmesi neticesinde ortaya çıkan çekme gerilmeleri ile oluşur. Kaplamanın bütün kalınlığınca görülen çatlaklar ise zeminde don sebebi ile meydana gelen kabarmaların sonucu olarak ortaya çıkan çekme gerilmeleri ile oluşur. Düşük ısı çatlaklarının oluşumuna etki eden en önemli faktör asfalt bağlayıcının sahip olduğu ısı hassasiyeti ve penetrasyondur. İklim şartlarının soğuk olduğu yerlerde ısı hassasiyeti düşük ve penetrasyon değeri yüksek asfaltlar kullanılırsa bu tip çatlaklar önlenabilir veya geciktirilebilir [54].



Şekil 12. Kaplamada oluşan düşük ısı çatlağı [61]

1.4.1.3.3. Diğer Çatlaklar

Kenar çatlakları; banket yanal desteklerinin eksikliği, banketlerde oturma, drenaj koşullarının yetersizliği, don etkisi, kaplamanın çevresindeki bitki örtüsü ve nem benzeri sebeplerle oluşan çatlaklardır.

Kayma çatlakları; kaplamaya ağır taşıtların tekerlekleri ile yapmış oldukları yatay doğrultudaki kuvvetlerin etkisi ile tabakaların birbirlerine göre yanal yöndeki

hareketlerinden, bir diğ er ifade ile temel tabakası üzerinde kaplama tabakasının kayması ile oluşan çatlaklardır [59].



şekil 13. Kaplamada oluşan kenar çatlakları [60]



şekil 14. Kaplamada oluşan kayma  atlağı [60]

1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcılara sahip oldukları özellikleri belirlemek için Karayolları Teknik şartnamesinde yer almakta olan Geleneksel bağlayıcı deneyleri ile Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP, Strategic Highway Research Program) tarafından geliştirilmiş olan “Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama” (Superpave) şartnamesinde yer alan performans esaslı bağlayıcı deneyleri uygulanmaktadır.

Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler

- Penetrasyon deneyi
- Yumuşama noktası deneyi
- Parlama noktası deneyi
- Düktilite deneyi
- Özgül ağırlık deneyi
- Frass kırılma noktası deneyi
- Çözünürlük deneyi
- İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyler

- Dönel viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) deneyi
- Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
- Basınçlı yaşlandırma kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) deneyi
- Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) deneyi
- Kiriş eğme reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) deneyi.

1.5.1. Geleneksel Bitüm Deneyleri

1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi

Bitümlü bağlayıcıların sertlik veya kıvamlılıkları penetrasyon deneyi ile belirlenmektedir. Deneyde 100 gr ağırlığındaki yük etkisi altında standart bir iğnenin 5 sn süre içerisinde bitümlü bağlayıcıya dikey olarak battığı mesafe 0.1 mm cinsinden ölçülür. Bitümün kıvamlılılığı ile penetrasyon değeri arasında ters orantı olup, penetrasyon değerinin artması bitümün yumuşaklığının arttığını yani kıvamlılılığının azaldığını göstermektedir [44,62].



Şekil 15. Penetrasyon deney aleti

1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıklarını ve bitümün akmaya başladığı sıcaklığı belirlemek için yapılan deneydir. Standart halkalar içine dökülen bitüm numunelerinin üzerine 3.5 gr ağırlığındaki standart bilyeler bırakılır ve başlangıçta 5°C sıcaklığa sahip bu numuneler 5°C/dk hızla ısıtılmaya başlanır. Bitüm içerisindeki bilyelerin çerçeve tabanına değdiği andaki sıcaklık değeri termometreden okunur. Bu değer bitümlü bağlayıcının yumuşama noktası değeri olarak kabul edilir [63].



Şekil 16. Yumuşama noktası deney aparatları

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıkları penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine göre hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) ile belirlenir. PI, bitüm kıvamlılığının sıcaklığa bağlı olarak değişimini ifade etmektedir ve Formül 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}25) - 20 \cdot YN}{50 \cdot \log(\text{Pen}25) - YN - 120} \quad (1)$$

Formülde görülen YN; bitümün yumuşama noktası değerini, Pen25 ise 25°C’de bitümün penetrasyon değerini temsil etmektedir. PI değerinin düşük oluşu bitümlü bağlayıcının ısı duyarlılığının fazla olduğunu gösterirken, PI değeri yüksek olan bitümlü bağlayıcıların düşük ısı çatlakları ve kalıcı deformasyonlara karşı direncinin fazla olacağı düşünülmür.

1.5.1.3. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi

Bir maddenin alev teması halinde geçici olarak parlayıp ancak yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık bu maddenin parlama noktası olarak tanımlanmaktadır. Deney uygulanan numunenin alev ile temas ederek en az 5 saniye boyunca aralıksız yandığı sıcaklık ise yanma noktası olarak adlandırılmaktadır. Parlama noktasını belirlemek için farklı

yöntemler bulunmakla beraber 15-79°C arasında parlama noktasına sahip bitümlü maddelerin parlama noktasını belirlemek için Tagliabue açık kap deneyleri uygulanır. Parlama noktası daha yüksek olan asfalt çimentoları ile SC sınıfı (yavaş kür olan) sıvı asfaltlar gibi bitümlü maddeler içinse Cleveland açık kap deneyi uygulanmaktadır [54, 64].



Şekil 17. Cleveland parlama noktası cihazı

1.5.1.4. Düktilite Deneyi

Düktilitenin kelime anlamı uzama veya çekilebilmedir. Dolayısı ile düktilite bitümün uzayabilme veya çekilebilme yeteneğini ifade eder. Tanımsal olarak ise, belirli bir sıcaklıkta belirli bir hızla asfalt çimentosu ile yapılmış standart bir briketin kopmadan çekilebildiği mesafenin cm cinsinden değeri olarak tarif edilebilir. Düktilite bitümün bağlama yeteneğini göstermekte olup, düktilite değeri yüksek bitümlerin bağlayıcılık karakteri de yüksektir. Düktilite deneyi ile bitümlü bağlayıcıların düktiliteleri ölçülmektedir. Bu deney için 25°C sıcaklıktaki su içerisinde numuneleri 5cm/dk hızla çeken düktilite cihazı kullanılmaktadır. Numune brikette kopma meydana gelinceye kadar çekme işlemine devam edilir ve kopma meydana geldiği andaki uzama değeri cihaz kenarında bulunan cetvel ile cm cinsinden okunur. Bu deneyde aynı anda 3 numune deneye tabi tutulur. Üç numune için okunan düktilite değerlerinin ortalaması alınır ve bu değer bitümlü bağlayıcının düktilite değeri olarak kaydedilir [65].

1.5.1.5. Özgöl Ağırlık Deneyi

Bitümlü bağlayıcıların özgöl ağırlığı çoğunlukla piknometre yöntemi ile belirlenmektedir. Piknometre yöntemi ile özgöl ağırlığı bulmak için öncelikle piknometrenin darası alınır. Sonrasında piknometre saf su ile doldurularak tartılır. Bu tartımdan sonra piknometre içindeki saf su dökülür ve piknometrenin dörtte üçü bitüm numunesi ile doldurulup tartılır. Son aşamada ise dörtte üçü bitüm ile dolu olan piknometrenin kalan kısmı saf su ile doldurulup, tartılır. Bu tartımlardan elde edilen değerler Formül 2’de yazılarak bitümlü bağlayıcının özgöl ağırlığı bulunur [66].

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (2)$$

Bu formülde,

A: Piknometrenin darası

B: Piknometrenin saf su ile dolu ağırlığı

C: Piknometrenin yaklaşık dörtte üçü bitüm ile dolu ağırlığı

D: Piknometrenin bitüm ve saf su ile dolu ağırlığıdır.

1.5.1.6. Frass Kırılma Noktası Deneyi

Bu deney bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda gösterdikleri davranışı görmek, bir diğer ifade ile bitümlü bağlayıcıların çatlamaya başladıkları andaki sıcaklık değerini belirlemek amacı ile yapılır. Deneyde standart boyutlara sahip bir çelik plakanın üzeri 40 ± 0.1 gr bitüm ile kaplanır ve plakanın sıcaklığı $1^\circ\text{C}/\text{dk}$ hızla düşürülür. Plaka belli aralıklarla yavaş bir şekilde esnetilir ve bu işleme bitümlü bağlayıcıda ilk çatlama oluşuncaya kadar devam edilir. İlk çatlamanın meydana geldiği sıcaklık değeri bitüm numunesinin Frass kırılma noktası olarak kaydedilir [43].

1.5.1.7. Çözünürlük Deneyi

Çözünürlük deneyi, bünyelerinde mineral madde bulundurmayan veya çok düşük miktarda bulunduran asfalt bağlayıcıların trikloretilen, benzen, karbonsülfür vb. organik

çözücülerde çözünürlüğünü tespit edebilmek için yapılmaktadır. Trikloretillen içerisinde yapılan çözünürlük deneylerinde bitüm numunelerinin minimum %99 oranında çözülmesi gerekmektedir [44].

1.5.1.8. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)

İnce film halinde ısıtma deneyi, bitüm ile agreganın bir plent içerisinde karıştırılması sürecinde meydana gelen yaşlanmayı temsil eder. Bu deneyde, çapı 14 cm olan bir tepsi içerisine bitüm dökülüp yayılarak 3.2 mm kalınlığında bir asfalt filmi elde edilir. Bu numuneler 5-6 devir/dk hızla dönen bir platform üzerinde etüve koyulur ve 163 °C sıcaklıkta 5 saat bekletilir. Sonrasında etüvden çıkarılan numuneler tartılarak kütle kayıpları bulunur. Bu deneyden sonra numunelere yumuşama noktası ve penetrasyon deneyi uygulanarak yaşlanmanın bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri görülebilir [54].

1.5.2. Superpave Bitüm Deneyleri

Superpave yöntemi kaplamada trafik yükü ve iklim koşulları nedeni ile meydana gelen kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlaklarını kontrol altına alarak kaplamanın performansını arttırmak amacı ile geliştirilmiştir.

Üstün performanslı asfalt kaplama yöntemi olarak da adlandırılan superpave yönteminin en kıymetli özelliği uygulanan deneylerin standart sıcaklıkların aksine bitümlü kaplamaların hizmet edecekleri bölgelerde görülen sıcaklık değerlerinde yapılmasıdır. Böylelikle bitümlü bağlayıcının sahada göstereceği performansla doğrudan alakalı reolojik ve fiziksel özellikler analitik deneyler ile belirlenerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilir [2].

1.5.2.1. Dönel Viskozimetre (Rotational Viscosimeter, RV) Deneyi

Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcıların ne derece işlenebilir ve pompalanabilir olduğunu belirlemek amacı yapılmaktadır. Dönel viskozite silindirik şeklindeki bir milin belirli ve sabit sıcaklıkta bitümlü bağlayıcı numunesi içerisinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutmak için oluşacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile

bulunmaktadır. Burulma kuvveti viskozimetre ile bulunan asfalt bağlayıcının viskozitesi ile doğrudan ilgilidir [2].

Dönel viskozimetre deneyi sonucunda bitüm içerisindeki dönme hızı 20 rpm olan bir milin dönme hareketine karşılık olarak bağlayıcının göstermiş olduğu direnç ve viskozite değerleri belirlenmektedir. Bu deney 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda yapılmakta olup elde edilen verilerden bitümlü bağlayıcı için sıcaklık-viskozite grafiği çizilir. Bu grafik üzerinde 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP karşılık gelen sıcaklık değerleri belirlenir. Bu sıcaklık değerleri sırası ile bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirtmektedir. Superpave şartnamesi gereği 135°C sıcaklıkta ölçülen viskozite değerinin 3000 cP (centipoise)'yi aşmaması uygun görülmektedir [2].



Şekil 18. Dönel viskozimetre deney cihazı

1.5.2.2. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi, asfalt hazırlama tesisinde hava ve sıcaklığın tesiri ile karıştırma işlemi esnasında bitümde meydana gelen yaşlanmayı laboratuvar ortamında gözlemleyebilmek için yapılmaktadır.

Deneyde her biri içerisine 35 ± 0.5 gr bitümlü bağlayıcı dökülmüş olan 8 adet şişe 163 ± 0.5 °C sıcaklığa ayarlanmış RTFOT cihazına yerleştirilir. Şişelere hava üfleyici ile 4000 ± 200 ml/dk hızla hava verilerek numuneler 15 ± 0.2 dev/dk hızla 85 dk boyunca

döndürülmektedir. Deney sonunda kütle kaybı belirlenecek numunelerin soğuması için 60-80 dk beklenir. Diğer numuneler ise hızlıca başka kaplara aktarılır. Kütle kaybını belirlemek için Formül 3 kullanılır [67].

$$\text{Kütle kaybı, \%} = \frac{\text{İlk Kütle} - \text{Yaşlanmış Kütle}}{\text{İlk Kütle}} \times 100 \quad (3)$$



Şekil 19. RTFOT deney cihazı

1.5.2.3. Basıncılı Yaşlandırma Kabini (Pressure Aging Vessel, PAV) Deneyi

Kaplama tabakası zamanla trafik yükleri ve iklim gibi çevresel koşullar sebebi ile yaşlanmaktadır. Bu yaşlanmayı laboratuvar ortamında oluşturmak ve yaşlanma sonrası bitümlü bağlayıcıda meydana gelecek fiziksel ve reolojik özellikleri gözlemlemek amacı ile yapılacak deneylere numune elde etmek için PAV deneyi yapılmaktadır. PAV deneyi bitümlü bağlayıcının uzun dönem yaşlanmasını temsil ettiğinden bu deney RTFOT ile kısa dönemli yaşlanması yapılan numunelere uygulanmaktadır.

PAV deneyinde 20 saat süresince basınç ve sıcaklık etkisi ile yaşlandırma yapılmaktadır. Deney uygulama sıcaklığı bitümlü bağlayıcı sınıfına göre belirlenmekte olup bu sıcaklık değerleri 90 °C, 100 °C ve 110 °C olarak değişmektedir. Deney süresince numunelere etki eden basınç değeri ise 2.10 MPa'dır [68].

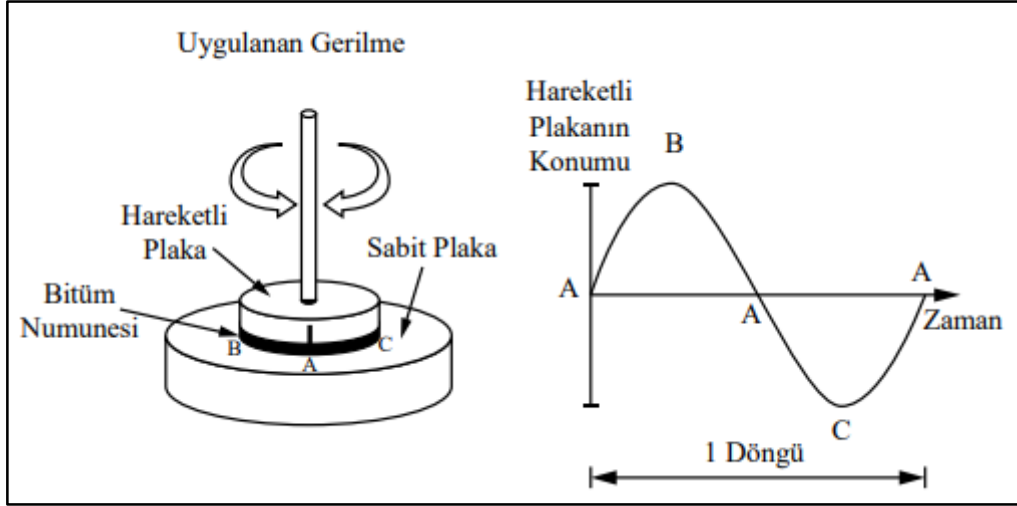


Şekil 20. PAV Deney cihazı

1.5.2.4. Dinamik Kayma Reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR) Deneyi

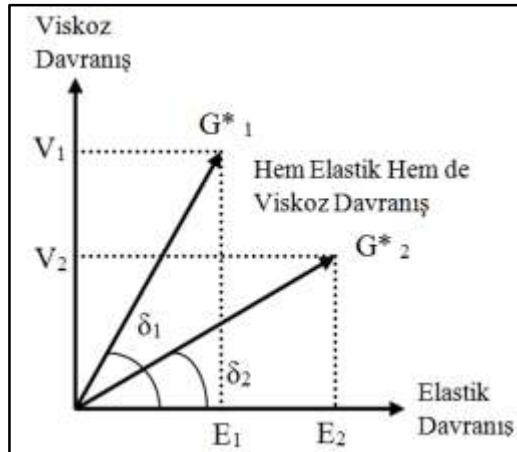
DSR deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine ve orta sıcaklıklarda yorulmaya karşı dayanımını belirlemek amacı ile yapılır. Bu deneyde bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı direncini belirlemek için yaşlandırılmamış veya RTFOT ile kısa dönem yaşlanması yapılmış numuneler kullanılırken, orta sıcaklıklarda yorulma dayanımını belirlemek için PAV deneyi ile uzun dönem yaşlanması yapılmış numuneler kullanılmaktadır. Tekerlek izi direncini belirlemek için 25 mm çapa sahip plakalar kullanılmakta iken yorulma dayanımını belirlemek için 8 mm çapındaki plakalar kullanılmaktadır.

DSR deneyinde şekil 21’de görüldüğü üzere bitümlü bağlayıcı numunesi hareketli üst plaka ile sabit alt plaka arasına yerleştirilmektedir. Deneyde üst plakanın A noktasından B noktasına gidip sonra A noktasına gelmesi ve ardından A noktasından C noktasına gidip tekrar A noktasına gelmesi bir devir olarak kabul edilmektedir ve deney 1.59 devir/dk frekansı ile uygulanmaktadır [69].



Şekil 21. DSR deneyi plakaları ve salınım döngüsü

DSR deneyinde üst plakanın yapmış olduğu salınım hareketi ile bitümlü bağlayıcının faz açısı (δ) ve kompleks modülü (G^*) belirlenmektedir. Belirlenen faz açısı ve kompleks modülü değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanımı ve yorulma dayanımı tespit edilmektedir. Tekerlek izi dayanımı için $G^*/\sin\delta$ parametresi kullanılmakta olup bu değer orijinal bitümlü bağlayıcılar için minimum 1.0 kPa, RTFOT ile yaşlandırılan bitümlü bağlayıcılar için minimum 2.2 kPa olması gerekmektedir. Yorulma dayanımı için ise $G^*.\sin\delta$ parametresi kullanılmaktadır ve bu değer maksimum 5000 kPa olması gerekmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere $G^*/\sin\delta$ değerindeki artış tekerlek izine karşı gösterilecek direncin arttığını, $G^*.\sin\delta$ değerinin artması yorulma dayanımının azaldığını göstermektedir [70].



Şekil 22. Bitümün viskoelastik davranışı

1.5.2.5. Kiriş Eğme Reometresi (Bending Beam Rheometer, BBR) Deneyi

Bitümlü kaplamaların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı göstereceği direnci laboratuvar ortamında gözlemlemek için kiriş eğme reometresi deneyi uygulanmaktadır. BBR deneyinde kiriş şeklinde hazırlanmış bitüm numuneleri öncelikle deney cihazının sıvı banyosunda belirli bir süre bekletilmektedir. Ardından cihazdaki mesnetlere yerleştirilen numunelere 240 sn süre ile 980 ± 5 mN büyüklüğünde sabit ve tekil yük uygulanır. Cihaz yazılımı yük uygulama süresince kiriş orta noktasında meydana gelen defleksiyonu ölçerek sünme rijitliği (S) ve sünme oranı(m) değerini kaydeder. Sünme rijitliği numunenin sünme gerilmelerine karşı göstermiş olduğu direnci temsil ederken, sünme oranı ise sünme rijitliğinin zaman içerisindeki değişimini ifade eder. 60. sn’de ölçülen S değerinin maksimum 300 MPa ve m değerinin minimum 0.3 MPa olması gerekmektedir. Bu şartları sağlayan bitümler ile inşa edilen bitümlü kaplamaların deney uygulanan sıcaklıktan 10 °C’den daha düşük sıcaklıklarda yeterince esnek davranarak düşük sıcaklık çatlaklarına karşı yeterli direnci göstereceği düşünülmektedir [71,72].

1.6. Bitüm Modifikasyonu

Bitümlü kaplamalardan mevcut trafik ve çevre koşullarına karşı dirençli, hizmet ömrü süresince üstün performanslı ve maliyet açısından da ekonomik olmaları beklenmektedir. Bir başka ifade ile kaplamalar deformasyonlara, ayrışmalara ve çatlamalara karşı yeterli direnç göstermeli ve beklenen zamandan önce bakım-onarım ihtiyacı duymamalıdır. Kaplamalardan beklenen fiziki, mekanik ve ekonomik özellikleri karşılamak için bitüm veya bitümlü karışımları modifiye etme yoluna gidilmiştir. Bitüm modifikasyonu ile bitüme farklı oranlarda çeşitli katkı maddeleri eklenip karıştırılarak bitümün özellikleri iyileştirilmektedir.

Bitüm modifikasyonun amaçları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bitümü yumuşatarak düşük servis sıcaklıklarında çatlakları azaltmak,
- Bitümü sertleştirerek yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izlerini azaltmak,
- Yüksek kayma direncine sahip kaplama yüzeyi elde etmek,
- Bitümün işlenebilirliğini arttırmak,
- Agrega-bitüm adezyonunu arttırarak soyulmayı en aza indirmek,
- Bitümlü karışımların stabilite ve mukavemetini arttırmak,

- Terleme ya da akmayı azaltmak,
- Bitümlü bağlayıcıları güçlendirmek,
- Düşük kaliteye sahip agregaları kullanılabilecek duruma getirmek,
- Uygulama alanlarını genişletmek,
- Uzun vadede ekonomik kaplamalar inşa etmek [73].

1.6.1. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Malzemeleri

Bitüm modifikasyonunda uzun yıllardır birçok farklı madde katkı olarak kullanılmıştır. Bitümde modifiyer olarak kullanılan katkı maddeleri Tablo 1’de verildiği gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 1. Bitümde modifiyer olarak kullanılan katkı maddelerinin sınıflandırılması [51,73]

Katkı Tipi		Katkı Maddesi		Bitüm Kıvamı Üzerindeki Etkileri
Filler		• Mineral Filler • Taş tozu, Kireç, Portland Çimentosu, Uçucu kül • Sülfür • Karbon Siyahı		Sertleştirme
Genleştirici (Extender)		• Sülfür • Lignin (Odun özü)		Sertleştirme
POLİMERLER	Elastomerler	• Doğal Kauçuk • Yapay Kauçuk • Stiren butadien (SBR) • Stiren butadien stiren (SBS) • Dönüştürülmüş Kauçuk • SEBS • EPDM		Elastikiyet, Sertleştirme
	Termoplastikler	• Polietilen • Polipropilen • Etilen Vinil Asetat (EVA) • Polvinil Klorür (PVC) • Asetaller • Akriklikler • Floroplastikler	• Polisülfid • Polikarbonat • Polifenilen eter • Polistiren • Polisülfon • Poliüretan • Poliamidler	Sertleştirme

Tablo 1'in devamı

Termoset	• Alkitler • Epoksiler • Kazein • Aminoplastlar • Fenolikler	• Alil • Dialilftalat • Melamin • Poliester	Sertleştirme
Reaktif Terpolimer	• Elvoley RET		Kalıcı Sertleştirme, Elastikiyet
Fiber	• Doğal Fiber • Asbest • Taşyünü	• Yapay Fiber • Polipropilen • Fiberglas • Polyester	Sertleştirme
Oksidan	• Marganez Tuzu		Sertleştirme
Antioksidan	• Kurşun Karışımlar • Kalsiyum tuzu • Karbon		Yumuşatma
Hidrokarbon	• Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları • Sertleştirme ve doğal asfaltlar		Sertleştirme /Yumuşatma
Soyulma Önleyici	• Kireç • Aminler		Yumuşatma

1.7. Arı Kökenli Organik Balmumu

Arıların peteklerini inşa etmek için karın halkalarında yer alan balmumu bezlerinden salgıladıkları sarı veya daha koyu renkteki madde balmumu olarak adlandırılmaktadır. Arıların karın bölgelerini meydana getiren segmentlerde sağ ve sol tarafta olmak üzere bir çift salgı bezi bulunmaktadır. Bu salgı bezleri işçi arıların balmumu oluşturma döneminde kalınlaşıp mum salgılama özelliği kazanır. Balmumu, salgı bezleri üzerine sıvı halde salgılanmakta ve daha sonra mum cepleri içerisinde katılaşarak küçük pulcuklar halini almaktadır. Arılar balmumu pulcuklarını ayakları yardımı ile ağızlarına götürerek çiğner ve yumuşatarak yoğurur. Balmumu bu aşamalardan sonra petek yapımında kullanılır [74].

Balmumu petek yapımının yanı sıra çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kozmetik sektöründe krem ve sabun yapımında, gıda sektöründe kaplayıcı ajan olarak kullanımına ek olarak kağıt, boya, tekstil sanayinde, sağlık sektöründe ve süs eşyası yapımı gibi birçok alanda kullanılır [75].



Şekil 23. Balmumu [76]

Tablo 2. Balmumu içerisindeki bileşenler ve oranları [77]

Bileşen	Yüzdece Bileşen Miktarı (%)
Hidrokarbonlar	14
Monoesterler	35
Diesterler	14
Triesterler	3
Hidroksi Monoesterler	4
Hidroksi Poliesterler	8
Asit Esterler	1
Asit Poliesterler	2
Serbest Yağ Asitleri	12
Alkoller	1
Diğer	6

1.8. Bor

Bor, atom numarası 5 olan ve periyodik tabloda B simgesi ile gösterilmekte olan yarı metal ve yarı iletken karaktere sahip bir elementtir. Bor elementi doğada serbest halde bulunamaz, farklı metal ve ametaller ile çeşitli bileşikler oluşturur. Birbirinden farklı özellikler gösteren bu bileşikler borun farklı endüstri dallarında kullanımını sağlar. Bor bileşiklerinin kullanım alanları; askeri ve zırhlı araçlar, cam sanayi, elektronik ve bilgisayar sanayi, inşaat sektörü, plastik ve kauçuk sanayi, ilaç ve kozmetik sanayi, enerji sektörü,

kimya sanayi, seramik sanayi, metalürji, nükleer sanayi, otomotiv sanayi, tarım sektörü ve tekstil sektörü olarak sıralanabilir [78, 79].

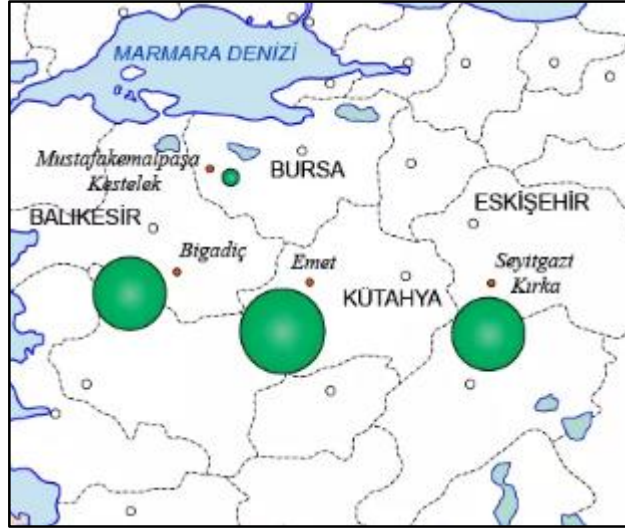


Şekil 24. Bor madeni [80]

Bor yatakları yeryüzünde bazı bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu bölgeler Şekil 24'te gösterilmiştir. Türkiye dünyadaki bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahiptir ve bu rezervler işlenmesi kolay, kentlere ve ana ulaşım noktalarına yakın bölgelerde bulunur [81].



Şekil 25. Dünyada bor rezervlerinin yoğun olduğu bölgeler [81]



Şekil 26. Türkiye'de bor rezervlerinin yoğun olduğu yerler [82]

Bor oksijen ile bağ kurmaya meyillidir ve bu nedenle farklı birçok bor-oksijen bileşiği bulunmaktadır. Bu bileşikler çok genel bir ifade ile borat olarak adlandırılmaktadır. Bilinen yaklaşık 230 borat minerali olmasına rağmen bunların çok azı ticari öneme sahiptir. Ticari önemi bulunan bor mineralleri ve bileşikleri Tablo 3'te verilmiştir [81].

Tablo 3. Ticari önemi bulunan bor mineralleri ve bileşikleri

Mineral/Bileşik Adı	Kimyasal Formül	B ₂ O ₃ İçeriği, %
Mineraller		
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43,0
Kolemanit	Ca ₄ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8
Bileşikler		
Bor oksit	B ₂ O ₃	100,00
Sodyum Perborat Monohidrat	NaBO ₃ H ₂ O	34,88
Sodyum Perborat Tetrahidrat	NaBO ₃ 4H ₂ O	23,45
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56,4
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,12
Boraks Pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	48,8
Boraks Dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5

Bor oksit (B₂O₃), borik asitin dehidrasyonu sonucunda elde edilmektedir. Borik asit (H₃BO₃) ısıtıldığında borik asitten 100 °C'de bir mol, 140 °C'de bir mol su uzaklaşır. Isıtma işlemi çok arttırıldığında kızıl derecede borik asit bütün suyunu kaybeder ve bor oksite dönüşür. Tablo 4'te bor oksitin üretim reaksiyonları gösterilmiştir [83].

Tablo 4. Bor oksitin üretim reaksiyonları

No	Reaksiyon
1	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_3\text{BO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$
2	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_3\text{BO}_3$
3	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_3\text{BO}_3$
4	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 4\text{HNO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}_3\text{BO}_3 + 2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
5	$\text{H}_3\text{BO}_3 \rightarrow \text{HBO}_2 + \text{H}_2\text{O} (100^\circ\text{C})$
6	$4\text{HBO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O} (140^\circ\text{C})$
7	$\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightarrow 2\text{B}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} (\text{Kızıl derece})$

1.9. Yapısal Analiz

1.9.1. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Kızılötesi spektrumu elde etmek amacı ile yaygın olarak kullanılan analitik yöntemlerden bir tanesi Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy)'dir. Bu yöntem katı, sıvı ve gaz halindeki numunelere uygulanabilmesi ve uygun numune alındığında birçok madde için kullanılabilmesi sebebi ile avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemde ışıma şiddeti zamana bağlı bir fonksiyon olduğundan her dalga boyu için ayrı ayrı tarama işlemi yapmaya ihtiyaç duymadan hızlıca yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilmektedir. Bu spektroskopi sayesinde moleküller arasındaki bağların karakterizasyonu yapılır. Böylece organik bileşiklerin yapısında bulunan fonksiyonel gruplar, bağların durumu ve bağlanma yerleri tespit edilir. Bunlara ek olarak, FT-IR ile yapılarında C ve H bulunan mineraller üzerinde çalışılır ve mineral yapı bünyesinde bulunan uçucu maddelerin konsantrasyonları bulunur [55].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Arı kökenli balmumu ve bor oksit (B_2O_3) ile bitümü modifiye ederek bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinin iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada kullanılan malzemeler ve izlenen yöntem aşağıda verilmiştir.

Kullanılan Malzemeler:

- 50/70 Penetrasyon sınıfı bitüm
- Bir takım yumuşatıcı ve uçucu kısımları ekstrakte edilmiş arı kökenli balmumu
- Uygun bir çözücü ile çözelti formuna getirilen bor oksit

İzlenen Yöntem:

Bu çalışmada farklı polaritede çözücüler (diklormetan, aseton vb.) kullanılarak balmumu içerisinde bulunan ve bitüme eklendiğinde bitümde aşırı yumuşaklığa sebebiyet vererek bitümün ısı duyarlılığını olumsuz etkileyebilecek fazla yumuşatıcı ve uçucu kısımlar ekstrakte edilmiştir (arındırılmıştır). Geride kalan kısım katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Diğer yandan bor oksit ise uygun bir çözücü ile çözelti formuna getirilmiştir. Balmumundan elde edilen katkı maddesi ve çözelti formundaki bor oksit ayrı ayrı ve değişik oranlarda birlikte saf bitüme eklenerek bitüm modifiye edilmiştir. Yapılan modifikasyonun saf bitümün yapısal, fiziksel ve reolojik özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişiklikleri incelemek için aşağıda verilen deneysel çalışmalar yapılmıştır.

a) Yapısal Özellikleri Belirlemek İçin Yapılan Analizler

- FT-IR

b) Fiziksel Özellikleri Belirlemek İçin Yapılan Deneyler

- Penetrasyon
- Yumuşama Noktası
- Düktilite
- Parlama ve Yanma Noktası
- Nicholson Soyulma
- Özgül Ağırlık
- Trikloretilende Çözünürlük

c) Reolojik Özellikleri Belirlemek İçin Yapılan Deneyler

- RV

- RTFOT
- PAV
- DSR
- BBR

2.1. Modifiye Bitümün Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan saf bitüm 50/70 penetrasyon sınıfında olup Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Arı kökenli balmumu Trabzon'da bulunan yerel arıcılardan ve bor oksit ise Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletme Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.



Şekil 27. 50/70 penetrasyonlu bitüm



Şekil 28. Arındırılmış balmumu katkısı



Şekil 29. Bor oksit katkısı

Çalışmanın ilk aşamasında balmumu modifiye bitümler hazırlanmıştır. Akıcı kıvama getirilen saf bitüme ağırlığının %1, %3, %5, %7 ve %9'u oranlarında balmumu katkısı eklenmiştir. Balmumu ile bitüm dört kollu mekanik karıştırıcı ile 150 °C sıcaklıkta 1000 rpm hızında 30 dakika boyunca karıştırılarak balmumu modifiye bitümler üretilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise bor oksit ve bor oksit+balmumu modifiyeli bitümler hazırlanmıştır. Akıcı kıvamdaki bitüme ağırlığınca %3 bor oksit, %1 bor oksit+%1 balmumu, %1 bor oksit+ %3 balmumu, %1 bor oksit+%5 balmumu ve %3 bor oksit+%3 balmumu ilave edilerek 150 °C sıcaklıkta 1000 rpm hızında 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Böylelikle modifiye bitüm numunelerinin hazırlanması tamamlanmıştır.



Şekil 30. Modifiye bitümlerin hazırlanması

Bu çalışmada birden fazla sayıda katkı maddesi kullanılması sebebiyle hazırlanan modifiye bitümler katkı maddelerinin ismi ve bitüme katılma oranı ile adlandırıldığından uzun isimler oluşmaktadır. Bu nedenle hazırlanan modifiye bitümler Tablo 5'te verildiği gibi kodlandırılmıştır. Çalışma içerisinde bu kodlar kullanılacaktır.

Tablo 5. Numune içeriğine göre numune kodları

Numune İçeriği	Numune Kodu
Saf Bitüm	SAF
Saf Bitüm + %1 Balmumu	1BM
Saf Bitüm + %3 Balmumu	3BM
Saf Bitüm + %5 Balmumu	5BM
Saf Bitüm + %7 Balmumu	7BM
Saf Bitüm + %9 Balmumu	9BM
Saf Bitüm + %3 Bor oksit	3BO
Saf Bitüm + %1 Bor oksit + %1 Balmumu	1BO+1BM
Saf Bitüm + %1 Bor oksit + %3 Balmumu	1BO+3BM
Saf Bitüm + %1 Bor oksit + %5 Balmumu	1BO+5BM
Saf Bitüm + %3 Bor oksit + %3 Balmumu	3BO+3BM

2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1. FT-IR Analizinin Yapılışı

Saf ve modifiye bitümlerin yapısal karakterizasyonunu yapmak ve böylelikle katkı maddelerinin bitümde meydana getirmiş olduğu yapısal değişiklikleri gözlemlemek amacı ile FT-IR analizi yapılmıştır. Analiz için katkı maddeleri ve hazırlanan bitümlerden 1-2 mg alınarak FT-IR cihazının numune tablasına yerleştirilmiş ve yapısal incelemeler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Penetrasyon Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye edilmiş bitümlerin sertlik derecesini, bir diğer ifade ile kıvamlılıklarını belirlemek için penetrasyon deneyi yapılmıştır. Bu deney için saf ve modifiye bitümler kolayca akacak kıvama gelene kadar etüvde ısıtılmış ve penetrasyon numune kaplarına dökülmüştür. Numuneler oda sıcaklığında 90 dk bekletildikten sonra $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ sıcaklıktaki

su banyosunda 60 dk bekletilmiştir. Bu işlemlerden sonra deney numunesi su banyosundan çıkarılmış ve penetrasyon cihazına yerleştirilmiştir. Hemen ardından standart bir iğnenin 100 g yük altında 5 sn süre içerisinde numuneye batma mesafesi ölçülmüştür. Her numune için 3 kez ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması deneye tabi tutulan numune için penetrasyon değeri olarak kaydedilmiştir.



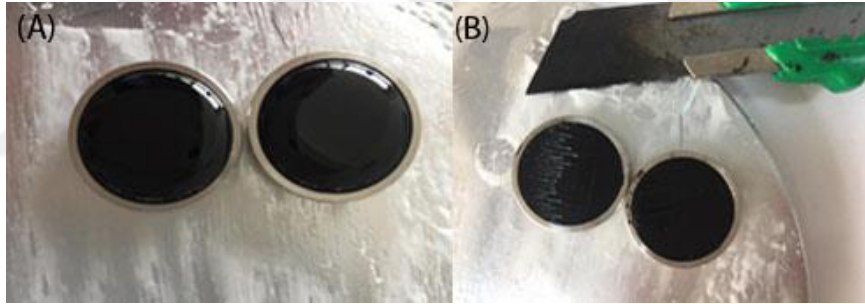
Şekil 31. Su banyosunda bekletilmekte olan bitüm numuneleri



Şekil 32. Penetrasyon iğnesinin numune yüzeyine indirilmesi

2.2.3. Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye edilmiş bitümlerin sıcaklığa karşı duyarlılıklarını belirlemek ve ısınma sebebiyle akmaya başladıkları sıcaklığı tespit etmek için yüzük-bilya yöntemiyle yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcı 150 °C sıcaklığındaki etüvde akışkan duruma gelinceye kadar ısıtılmış ve ardından 2 adet standart yüzüğün içerisine dökülmüştür. Numuneler soğumaları için oda sıcaklığında 60 dk bekletildikten sonra numunelerin yüzeyleri tıraşlanmıştır. Hazırlanan numunelerin üzerine bilyeler koyulmuş ve numuneler su banyosuna yerleştirilmiştir. Su banyosunda bulunan su 5°C/dk hızla ısıtılmaya başlanmıştır. Isınma neticesinde yumuşayan bitüm içerisindeki bilyelerin halkaları tutan çerçevenin tabanına değdiği andaki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. İki ölçüm sonucunun aritmetik ortalaması alınmış ve bu değer söz konusu numune için yumuşama noktası değeri olarak kaydedilmiştir.

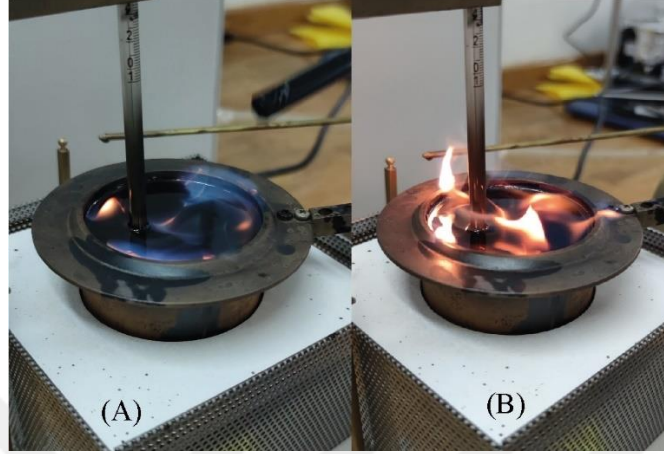


Şekil 33. (A) bitüm ile doldurulmuş yüzükler (B) tıraşlanmış numuneler

2.2.4. Parlama ve Yanma Noktası Deneyinin Yapılışı

Bu deney saf ve modifiye bitümlerin parlama ve yanma noktasını belirlemek amacı ile yapılmıştır. Saf ve modifiye bitümler akıcı kıvama gelinceye kadar 150 °C sıcaklıkta ısıtılmış ve deney kabına aktarılmıştır. Cam termometre numune içerisine kap tabanına değmeyecek şekilde yerleştirilmiş ve cihaz 15 °C/dk hızla ısıtılmaya başlanmıştır. Tahmin edilen parlama noktası değerine 28 °C kaldığında cihazın ısıtma hızı 5 °C/dk olarak ayarlanmıştır ve sıcaklık her 2°C arttığında numunenin üzerinden alev geçirilmiştir. Numune üzerinde bir noktadan başlayarak hızlıca numunenin yüzeyine yayılan bir alevlenme görülen sıcaklık değeri deneye tabi tutulan bitüm numunesi için parlama noktası değeri olarak

kaydedilmiştir. Numune üzerinde görülen alevlenmenin en az 5 saniye sürdüğü sıcaklık ise yanma noktası olarak kaydedilmiştir.



Şekil 34. Bitümde (A) parlama ve (B) yanmanın ilk görüldüğü an

2.2.5. Düktilite Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye edilmiş bitümlerin uzayabilme yeteneğini belirlemek için düktilite deneyi yapılmıştır. Akıcı hale gelene kadar ısıtılan bitüm, önceden iç yüzeyleri vazelin ile kaplanan düktilite numune kalıplarına dökülmüştür. Numuneler oda sıcaklığında 30 dk bekletildikten sonra 25°C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde de 30 dk bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler su banyosundan çıkarılıp yüzeyleri tıraşlanmıştır. Tıraşlanan numuneler tekrar su banyosuna koyulup 90 dk bekletilmiştir. Bekleme işleminin ardından numuneler su banyosundan alınıp düktilite deney cihazına yerleştirilmiştir. Ardından 5 cm/dk hızla numuneler çekilmeye başlanmıştır. Deney numunelerinde kopma meydana gelene kadar çekmeye devam edilmiştir. Numunelerde kopma meydana geldiği andaki uzama değeri cihazın kenarında yer alan cetvelden cm cinsinden okunmuş ve her numune için okunan 3 değer aritmetik ortalaması düktilite değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 35. Düktilite deneyine tabi tutulan numuneler

2.2.6. Nicholson Soyulma Deneyinin Yapılışı

Agrega ve bitüm karışımının su tesirine karşı dayanımını tespit etmek amacı ile soyulma deneyi yapılmıştır. Bu deney için bir behere 9.5 mm'lik elekten geçip 6.3 mm'lik elek üzerinde kalan yıkanmış ve kurutulmuş durumdaki agregadan 100 gr aktarılmıştır. Beher içerisindeki agregalar etüvde 150 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda 5 gr bitüm beher içerisine dökülmüş ve homojen bir karışım elde etmek için agregaya ile bitüm yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır. Agregaya-bitüm karışımı bir petri kabına dökülmüş ve ardından petri kabı bir tepsiye koyularak saf su ile üzerinde 3 cm su filmi oluşturulmuştur. Ardından içerisine petri kapları yerleştirilen tepsiler etüve koyulmuş ve 60°C'de 24 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda tepsiler etüvden alınmış ve petri kaplarındaki su dökülmüştür. Petri kapları yandan gelen ışık altında incelenip bitüm ile kaplı agregaya yüzeyinin bütün yüzeye oranı bir diğer ifade ile soyulma mukavemeti belirlenmiştir.



Şekil 36. 100 gr agrega alınması



Şekil 37. Petri kabına aktarılmış agrega-bitüm karışımı

2.2.7. Özgöl Ağırlık Deneyinin Yapılışı

Bu deneyde piknometre yöntemi ile saf ve modifiye edilmiş bitümlerin özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle piknometre kabının darası alınmış ve bu değer A değeri olarak kaydedilmiştir. Ardından piknometre saf su ile tamamen doldurularak 25 °C sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilip 30 dk bekletilmiştir. Bu süre sonunda saf su ile tamamen dolu olan piknometre su banyosundan çıkarılıp özenli ve hızlı bir şekilde kağıt

havlu ile kurularak tartılmış ve tartım sonucu B değeri olarak kaydedilmiştir. Bu aşamadan sonra piknometre boşaltılıp, temizlenmiş ve kurutulmuştur. Piknometre dörtte üçüne kadar akıcı kıvama getirilmiş bitüm ile doldurulup soğuması için oda sıcaklığında 40 dk bekletilmiştir. Ardından dörtte üçüne kadar bitüm ile dolu piknometre 25 °C sıcaklıktaki su banyosuna koyularak 30 dk bekletilmiştir. Bu süre sonunda piknometre su banyosundan çıkarılıp yine kağıt havlu ile hızlı ve özenli olarak kurutulmuştur. Kurulanan piknometre tartılmış ve tartım sonucu C değeri olarak kaydedilmiştir. Son olarak ise dörtte üçü bitüm ile dolu olan piknometreye tamamen doluncaya kadar saf su eklenmiş ve önceki aşamalarda olduğu gibi su banyosunda bekletildikten sonra çıkarılıp kurularak tartılmıştır. Bu son tartımın sonucu da D değeri olarak kaydedilmiştir. Bu aşamalar her bir deney numunesi için yapılmış ve elde edilen verilerden her numunenin özgül ağırlığı ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 38. Su dolu piknometre ve yarısi bitüm dolu piknometre tartımları

2.2.8. Trikloretilende Çözünürlük Deneyinin Yapılışı

Trikloretileten bitümü tamamen çözebilen bir çözücüdür. Bu nedenle saf bitüm bünyesinde yabancı bir madde bulunup bulunmadığının anlaşılabilmesi ve bunun yanısıra modifiye bitümlerin trikloretileten içerisinde çözünme yüzdesini belirleyebilmek için çözünürlük deneyi yapılmıştır. Deneye darası alınmış bir behere ısıtılarak akıcı duruma getirilen bitümden 2 gr aktarmakla başlanmıştır. Bu numune oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve ardından tartılmıştır. Tartım sonucu B değeri olarak kaydedilmiştir. Sonrasında içerisinde bitüm olan bu behere 100 ml trikloretileten aktarılmış ve bitüm ile karıştırılıp oda sıcaklığında 20 dk kadar bekletilmiştir. Bu esnada bir filtre kağıdı ile onu

tutmakta olan kap bir arada tartılarak tartım sonucu A değeri olarak kaydedilmiştir. Ardından filtre kağıdı ve kabı erlenmeyerin üstüne yerleştirilmiş ve hava vakum pompası da yerine bağlanmıştır. Bu aşamadan sonra bekleme süresini tamamlayan trikloretilen-bitüm karışımı filtre kağıdından süzülerek erlenmeyere dökülmüştür. Bu işlem esnasında filtreleme hızını arttırmak amacıyla hava vakum pompası orta düzeyde çalıştırılmıştır. Karışım sıvısı filtrelendikten sonra filtre kağıdı üzerinde kalan koyuluk beyaza yakın bir renk alıncaya dek trikloretilen ile yıkama yapılmıştır. Yıkama işlemi sonlandırıldıktan sonra filtre kağıdı ile kabı alınarak kuruması için oda sıcaklığında yarım saat kadar bekletilmiştir. Ardından üzerlerinde kalmış olabilen trikloretilenin tamamıyla buharlaşarak uzaklaşması için 110 °C sıcaklıktaki etüvde bir saat bekletilmiştir. Bir saat sonunda etüvden alınan filtre kağıdı ve kabı çözünmeyerek üzerinde kalmış olan bitüm ile birlikte tartılmış ve tartım sonucu C değeri olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Formül 4'te yazılarak çözünen yüzdesi hesaplanmıştır.

$$\text{Çözünen, \%} = \frac{B-(C-A)}{B} \times 100 \quad (4)$$

Formülde yazılan,

A: filtre kağıdı ile kabının toplam ağırlığı,

B: bitüm ağırlığı,

C: çözünmeyen bölüm ile filtre kağıdı ve kabının toplam ağırlığıdır.

2.2.9. Dönel Viskozite (RV) Deneyinin Yapılışı

Katkı maddelerinin saf bitümün işlenebilirliği üzerindeki etkisini görebilmek için saf ve modifiye bitümlere RV deneyi uygulanmıştır. Bu deneyde Brookfield DV2T model viskozimetre kullanılmıştır. Deney 120°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklarda uygulanarak bu sıcaklık değerlerindeki bitüm viskozitesi ölçülmüştür. Akıcı hale getirilmiş olan bitümden 8 gr alınarak silindirik deney kabına dökülmüş ve bu numune kabı deney cihazına yerleştirilmiştir. Ardından 21 numaralı mil cihazdaki yerine yerleştirilmiş ve bitüm numunesi içerisine indirilmiştir. 15dk sonra 20 dev/dk hızla milin dönme hareketi başlatılmıştır. Deney sonunda 3 adet okuma yapılmıştır. Bu okuma değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak numunenin deney yapılan sıcaklıktaki viskozite değeri belirlenmiştir.

Elde edilen verilerden yola çıkarak saf ve modifiye bitümler için sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiş ve grafik üzerinde 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP karşılık gelen sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerleri sırası ile bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını belirtmektedir.



Şekil 39. RV deney sistemi

2.2.10. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyinin (RTFOT) Yapılışı

Kaplama tabakasının inşaatı tamamlandıktan hemen sonra göstereceği performansı laboratuvar ortamında gözlemlemek için RTFOT yapılmıştır. Bu deney bitümün kısa dönemli yaşlanmasını temsil etmektedir. Deneye 8 adet numune şişesinin darası alınarak başlanmış ve bu şişelerin her birine 35 ± 0.5 gr bitüm dökülmüştür. Dökülen bitümün şişe iç yüzeyini tamamen kaplaması için şişe bitüm aktarımından hemen sonra yan yatırılıp bir tur döndürülmüştür. Bu numuneler soğumaları için oda sıcaklığında 1 saat bekletildikten sonra önceden $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ayarlanmış deney cihazına yerleştirilmiştir. Ardından 15 devir/dk hızla numuneler döndürülmeye başlanmış ve döndürme işlemi 85 dk devam ettirilmiştir. Deney süresince şişelere cihazın hava üfleyici sistemi ile 4000 ± 200 ml hava akışı sağlanmıştır. Deney sonunda numuneler cihazdan çıkarılmıştır. 2 adet numune ile kütle kaybı belirlenmiştir. Diğer 6 adet şişedeki numune ise kısa dönemli yaşlanmanın bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için ayrılmıştır.



Şekil 40. RTFOT cihazına yerleştirilmiş bitüm numuneleri

2.2.11. PAV Deneyinin Yapılışı

Bitümde meydana gelen uzun dönemli yaşlanmayı laboratuvar ortamında oluşturmak için PAV deneyi yapılmıştır. PAV deneyi için RTFOT ile kısa dönemli yaşlanması yapılan saf ve modifiye bitümlerden 50 ± 0.5 gr alınarak PAV kaplarına aktarılmıştır. Bu kaplar PAV deneyinin raflı aparatına yerleştirilmiş ve aparat cihaz içerisine koyulmuştur. Numuneler 100°C sıcaklık ve 21 bar (2070 kPa) basınç etkisi altında 20 saat boyunca yaşlandırılmıştır. Bu süre sonunda numuneler cihazdan çıkarılmış ve içlerinde sıkışan havanın uzaklaştırılması için öncelikle 163°C sıcaklıktaki etüve koyularak 15 dk bekletilmiştir. Sonrasında ise 170°C sıcaklıkta 30 dk boyunca vakum işlemi yapılmıştır. Böylelikle, yaşlandırma işlemi tamamlanmış ve uzun dönemli yaşlanmanın bağlayıcı özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için yapılacak deneylere numune hazırlanmıştır.

2.2.12. DSR Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine ve orta sıcaklıklarda yorulmaya karşı göstereceği direnci belirlemek için Bohlin DSR II cihazı ile DSR deneyi yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı dayanımı belirlemek amacı ile yaşlandırılmamış veya RTFO deneyine tabi tutulmuş bitüm numunesi 25 mm çapa sahip

plaka üzerine dökülmüş ve bu plaka deney cihazına yerleştirilerek iki plaka arasındaki bitüm yüksekliği 1 mm olarak ayarlanmıştır. Orta sıcaklıklarda yorulma dayanımını belirlemek için ise bitüm numunelerinde 8 mm çapa sahip plaka kullanılmış ve iki plaka arasındaki bitüm yüksekliği ise yine 1mm olarak ayarlanmıştır. Bütün deney numunelerine 1,59 devir/sn (10 rad/sn) frekansında kontrollü gerilme uygulanarak her numune için kompleks modülü ve faz açısı değerleri bulunmuştur. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılan numuneler için DSR deneyine 64 °C sıcaklıkta başlanmıştır. Deney uygulanan numune 64 °C sıcaklıkta şartname kriterini sağladığında bir üst sıcaklığa geçilmiş, sağlamadığında ise bir alt sıcaklığa geçilmiştir. PAV ile yaşlandırılan numuneler için ise, sıcaklık değerleri numunelerin yüksek sıcaklık performans sınıfı dikkate alınarak şartnameden seçilmiştir.

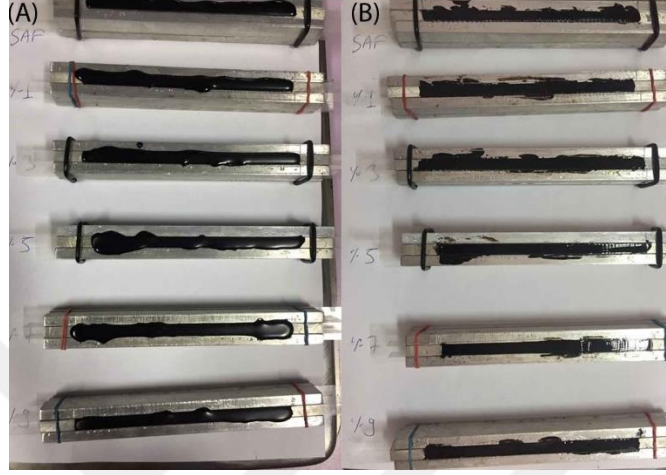


Şekil 41. DSR deneyi için hazırlanan numuneler

2.2.13. BBR Deneyinin Yapılışı

Saf ve modifiye bitümlerin düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımını belirlemek için BBR deneyi yapılmıştır. Deney için öncelikle numune kalıpları hazırlanmıştır. Numune kalıplarının bitüm ile temas edecek yerlerine yağ sürüldükten sonra uygun boyuttaki asetat kağıtları ile bu kısımlar kaplanmıştır. Ardından akıcı kıvama getirilen PAV ile yaşlandırılmış bitümler, içerisinde hava boşluğu kalmayacak şekilde numune kalıplarına dökülmüştür. İçerisinde bitüm olan numune kalıpları oda sıcaklığında 60 dk bekletildikten sonra kalıpların yüzeyi sıcak bir spatula ile traşlanmıştır. Oda sıcaklığında bir süre bekletilen kalıplar ardından soğutucuda birkaç dakika bekletilmiştir. Bu aşamalardan sonra bitüm numuneleri kalıptan çıkarılarak deney cihazının su banyosuna yerleştirilmiştir. Her numune su banyosunda bekletildikten sonra deney cihazına yerleştirilerek bitüm kirişi cihazın mesnetlerine oturtulmuştur. Ardından bitüm kirişinin orta noktasına 980 ± 50 mN

büyükliğındeki deney yükü 240 saniye boyunca uygulanmıştır. Deney -6 ve -12 °C olmak üzere iki sıcaklıkta yapılmıştır. Deney sonucunda saf ve modifiye bitümlerin sünme rijitliğı (S) ve sünme oranı (m) değeri belirlenmiştir.

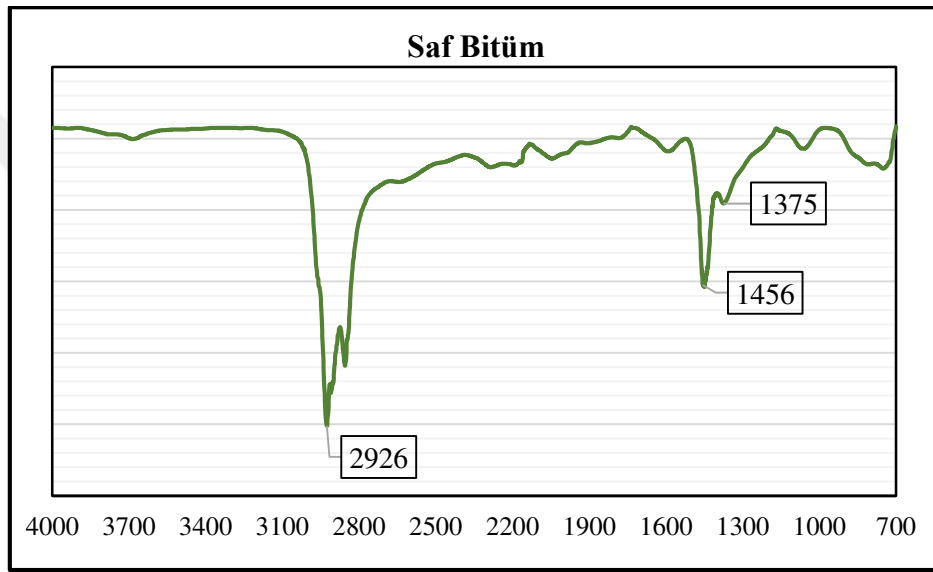


Şekil 42. (A) Bitüm ile doldurulmuş BBR kalıpları, (B) Tıraşlanmış BBR numuneleri

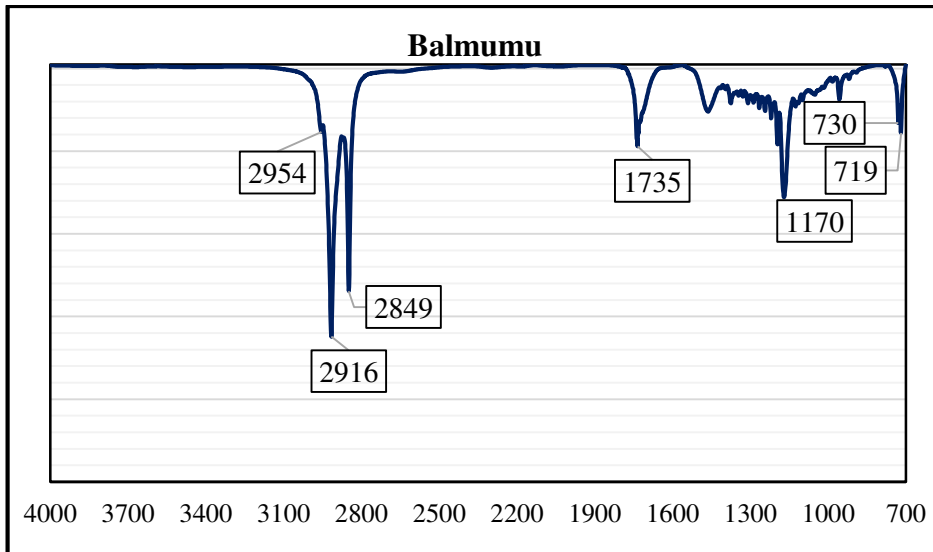
3. BULGULAR

3.1. FT-IR Analizi Sonuçları

Saf bitüm ve balmumunun FT-IR analizi sonuçları sırası ile Şekil 43 ve 44'te verilmiştir.



Şekil 43. Saf bitüme ait FT-IR spektrumu

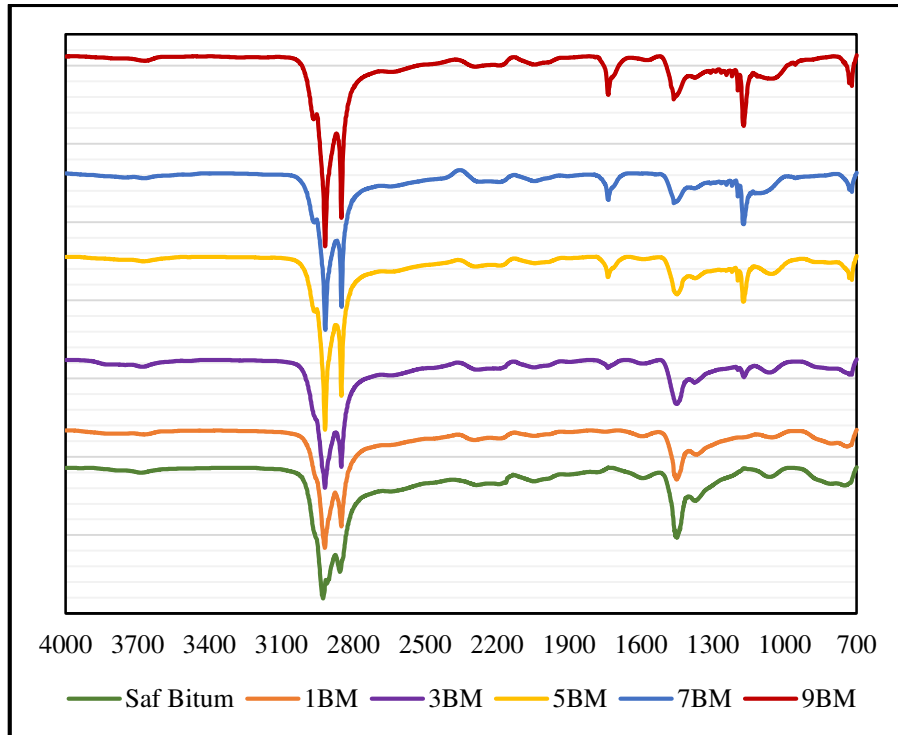


Şekil 44. Balmumuna ait FT-IR spektrumu

Şekil 43 incelendiğinde, saf bitümde 2926 cm^{-1} 'de C-H gerilim bandı ortaya çıkarken hidrokarbon zincirinde yer alan CH_2 ve CH_3 grubu deformasyon bantları sırasıyla 1456 cm^{-1} 'de ve 1375 cm^{-1} 'de gözlenmektedir.

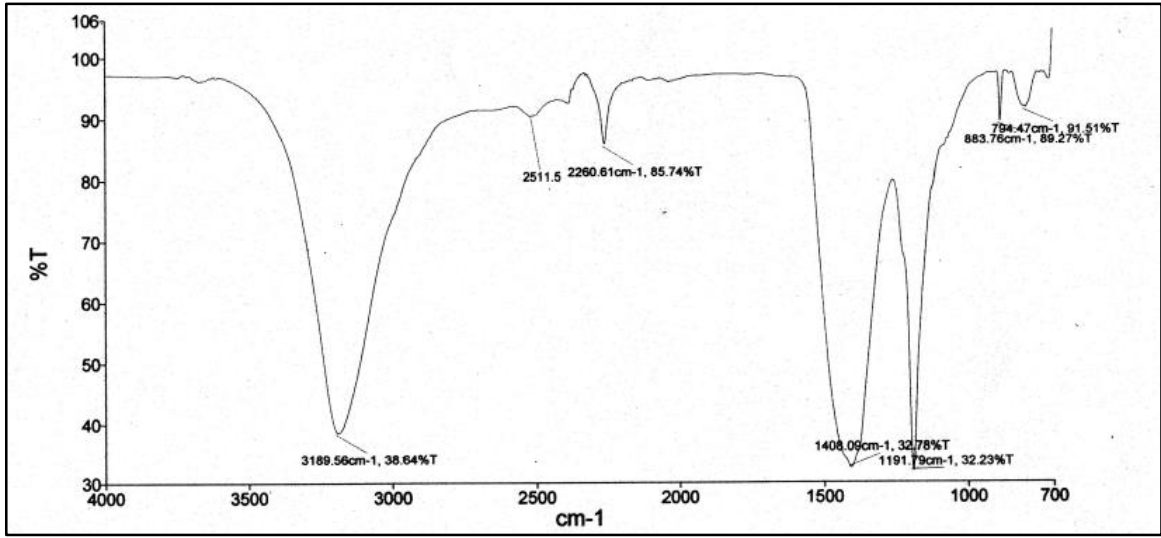
Şekil 44 incelendiğinde, balmumu fraksiyonunda 2954 cm^{-1} 'de vinilik C=C-H gerilim bandı gözlenirken saf bitüme göre hidrokarbon zincirindeki kısmi farklılık sebebiyle C-H gerilim bantları balmumundaki farklı hidrokarbon fonksiyonlarına ait olmak üzere 2916 cm^{-1} ve 2848 cm^{-1} 'de gözlenmektedir. Balmumu fraksiyonunun monoester, diester veya triester fonksiyonuna ait C=O gerilim bandı 1735 cm^{-1} 'de ortaya çıkarken aynı fonksiyonun O-C=O frakmentine ait pik ise 1170 cm^{-1} 'de gözlenmektedir. Yine hidrokarbon zincirinde yer alan CH_2 gerilim bandı 1463 cm^{-1} 'de ve CH_3 grubu gerilim bandı ise 1375 cm^{-1} 'de gözlenmektedir. Saf bitümden farklı olarak balmumunda doymamış fonksiyonun varlığı parmak izi bölgesinde ortaya çıkan $730\text{-}719\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen ikili pik olduğu anlaşılmaktadır. Bu pikler karbon zincirinin doymamış bölümünden ileri gelen düzlemdışı absorpsiyon bantlarıdır.

Şekil 45'te saf bitüm ve balmumu modifiyeli bitümlere ait FT-IR spektrumları toplu olarak verilmiştir.

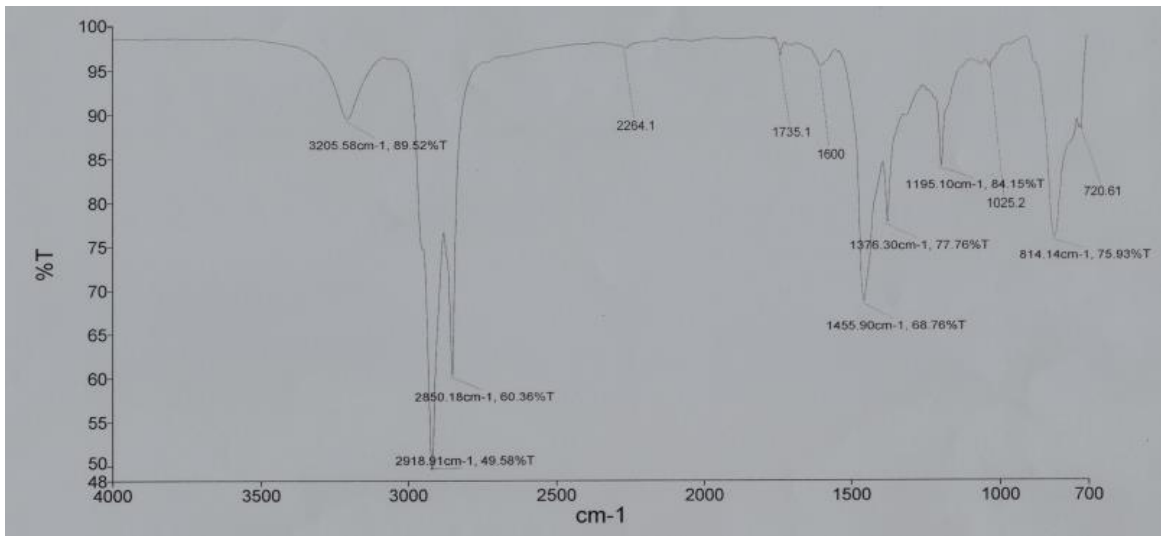


Şekil 45. Saf ve balmumu modifiyeli bitümlere ait FT-IR spektrumları

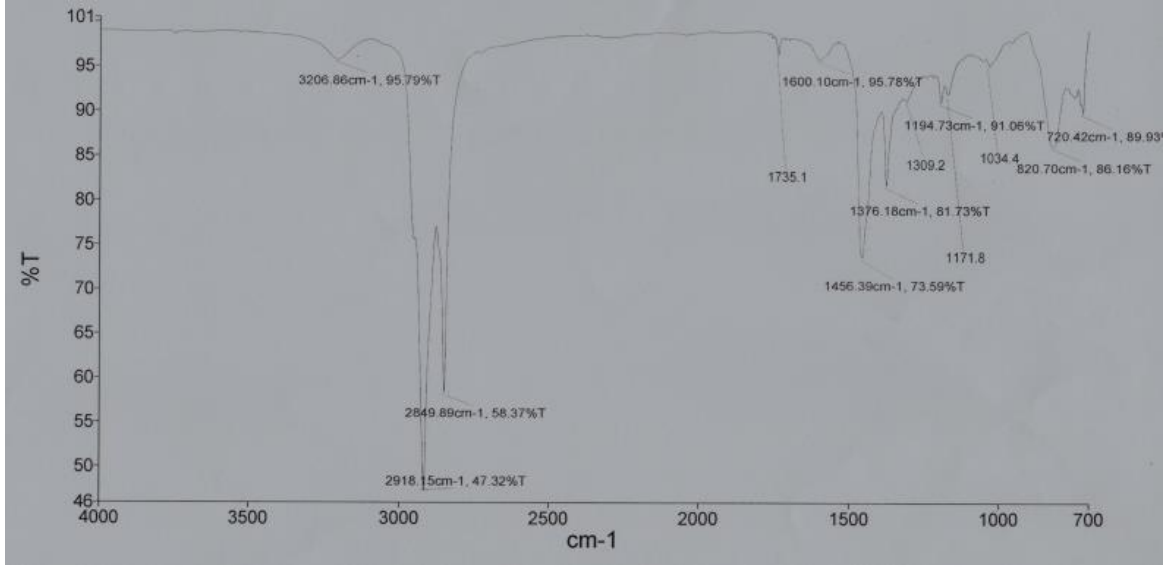
Şekil 45 incelendiğinde, saf bitüm ve balmumu fraksiyonunun karışımının IR spektrumunda saf bitüm ve balmumu içeriğinden ileri gelen mevcut piklerden farklı olarak karışımda monoester, diester veya triester fonksiyonuna ait 1735 cm^{-1} de ortaya çıkmış C=O gerilim bandına ilave olarak yaklaşık 1700 cm^{-1} de ikincil bir C=O bandının (pikinin) söz konusu olduğu görülmektedir. Bu pikin muhtemelen saf bitüm ve balmumu karışımının oluşumu esnasında zayıf hidrokarbon zinciri örtüşmesinin elektrostatik etkileri sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 46. Bor oksite ait FT-IR spektrumu



Şekil 47. 3BO modifiye bitüme ait FT-IR spektrumu



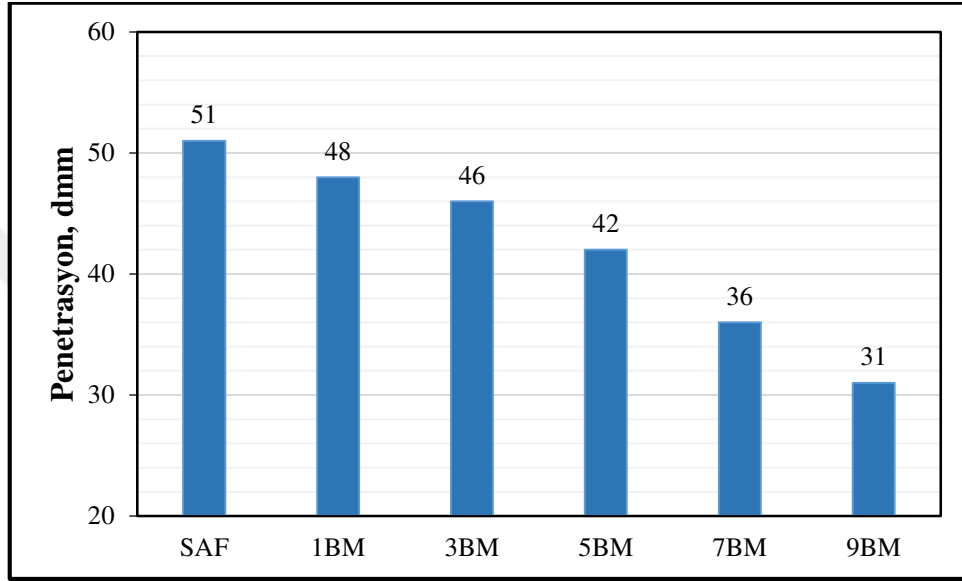
Şekil 48. 3BO+3BM modifiye bitüme ait FT-IR spektrumu

Şekil 46, 47 ve 48’de verilen FT-IR spektrumlarında bor oksitten ileri gelen B-OH gerilim bandı $3189\text{--}3206\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenirken, yine aynı spektrumlarda B-O gerilim bandı $1191\text{--}1195\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenmektedir. Şekil 47 ve 48’de verilen spektrumlarda bitüme ait C-H gerilim ve deformasyon bantları sırası ile $2849\text{--}2918\text{ cm}^{-1}$ aralığında ve $1370\text{--}1456\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenmektedir. Bor oksit ve bitümün etkileşmesinin çok zayıf olmasının sonucu olarak spektrum bantlarında gözle görülür bir değişim görülmemektedir. Bu durum bor oksit ve bitümün elektrostatik etkileşmesinin zayıf olduğunu göstermektedir.

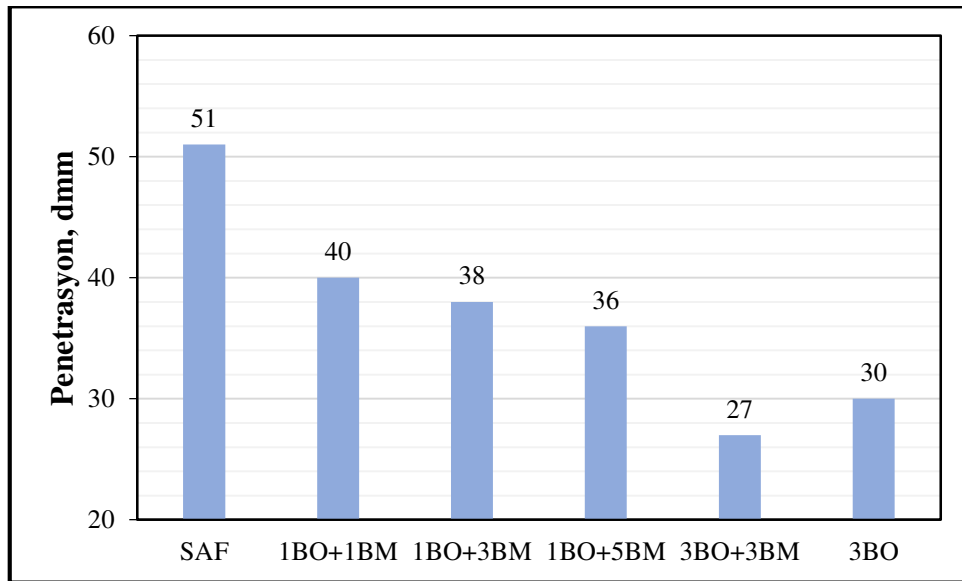
3.2. Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Penetrasyon deneyine ait sonuçlar Şekil 49 ve 50’de grafik halinde verilmiştir. Şekil 49’da verilen grafikte görüldüğü üzere, 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme balmumu ilavesi ile saf bitümün penetrasyon değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Saf bitüme %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında balmumu ilavesi ile saf bitümün penetrasyon değeri sırası ile %5.9, %9.8, %17.6, %29.4, %39.2 oranlarında azalmıştır. Bu durum balmumu ile yapılan modifikasyonun saf bitümün kıvamlılığını arttırdığını ve bitümü sertleştirdiğini göstermektedir. Şekil 49 ve 50 birlikte incelendiğinde ise 1BO+1BM, 1BO+3BM, 1BO+5BM modifiye bitümlerin sırası ile 1BM, 3BM ve 5BM modifiye bitümlerden daha düşük penetrasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum bor oksit ve balmumu birlikte kullanıldığında bor oksitin balmumunun sertleştirici etkisini daha da arttırdığını

göstermektedir. Saf bitüme %3 oranında bor oksit tek başına eklendiğinde saf bitümün penetrasyon değeri %41,2 azalmıştır. Saf bitüme %3 oranında balmumu tek başına eklendiğinde ise saf bitümün penetrasyon değeri %9.8 azalmıştır. Bu sonuçtan hareketle saf bitüm üzerinde bor oksitin sertleştirici etkisinin balmumundan çok daha belirgin olduğu söylenebilir.



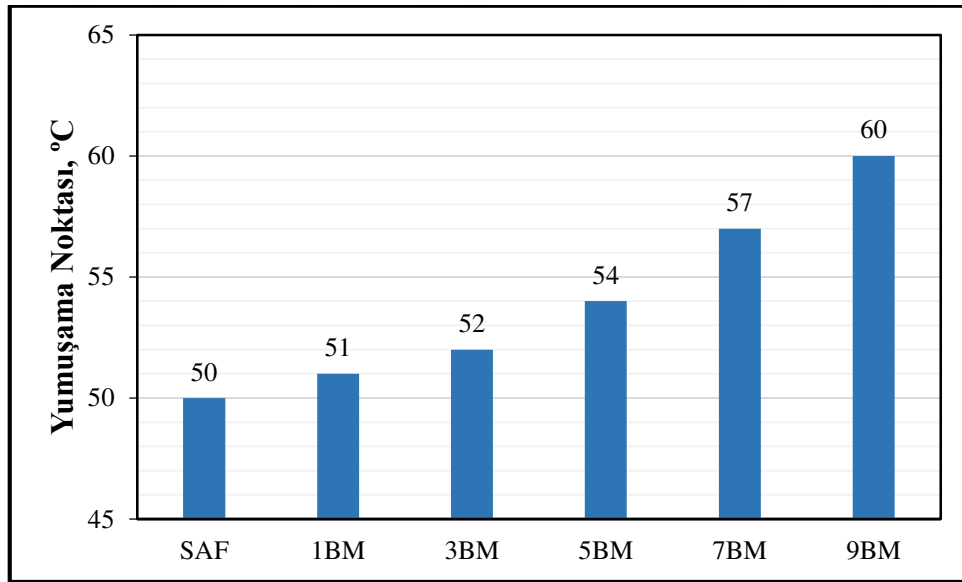
Şekil 49. Balmumu modifiyeli bitümlere ait penetrasyon deneyi sonuçları



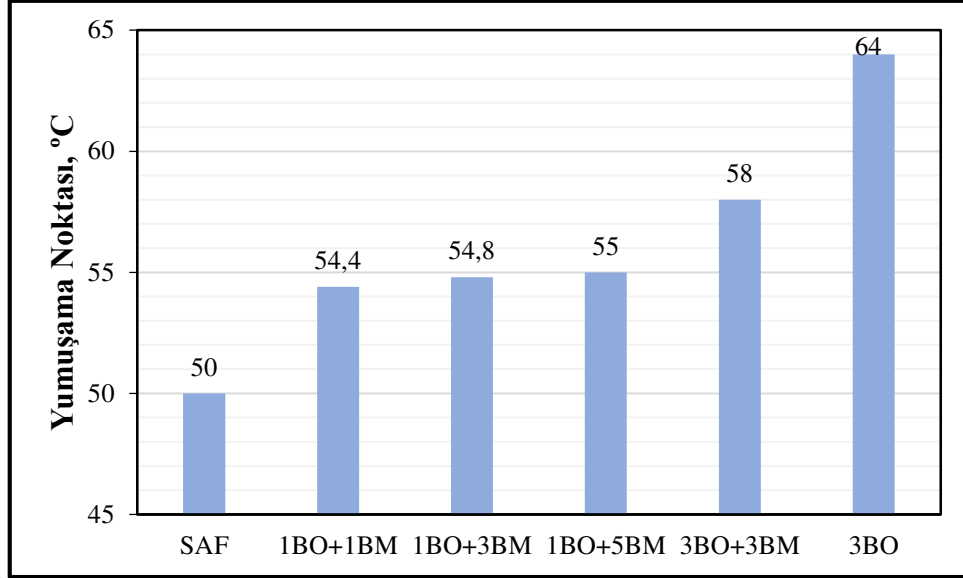
Şekil 50. Bor oksit içeren bitümlere ait penetrasyon deneyi sonuçları

3.3. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Yumuşama noktası deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 51 ve 52’de grafik olarak verilmiştir. Şekil 51 incelendiğinde, saf bitüme eklenen balmumu oranı ile paralel olarak saf bitümün yumuşama noktası değerinin arttığı görülmektedir. En yüksek yumuşama noktası değeri %9 oranında balmumu içeren bitümde görülmüş olup, %9 oranında balmumu ilavesi saf bitümün yumuşama noktası değerini %20 oranında arttırmıştır. Şekil 51 ve 52’de verilen grafikler birlikte incelendiğinde ise balmumu ve boroksit bir arada kullanıldığında saf bitümün yumuşama noktası değerinin daha da arttığı görülmektedir. 1BO+1BM, 1BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümler sırası ile 1BM, 3BM ve 5BM modifiye bitümlere kıyasla 3.4, 2.8 ve 1 °C daha yüksek yumuşama noktası değeri göstermiştir. 3BO+3BM modifiye bitüm 3BM modifiye bitümden daha yüksek yumuşama noktası değeri gösterirken 3BO modifiye bitümden daha düşük yumuşama noktası değeri göstermiştir. Bu durum bor oksitin %3 oranında tek başına kullanımının yumuşama noktası üzerindeki etkisinin balmumundan daha belirgin olduğunu göstermektedir. Saf bitüme %3 oranında bor oksit eklenmesi ile saf bitümün yumuşama noktası değeri %28 artış göstermiştir.

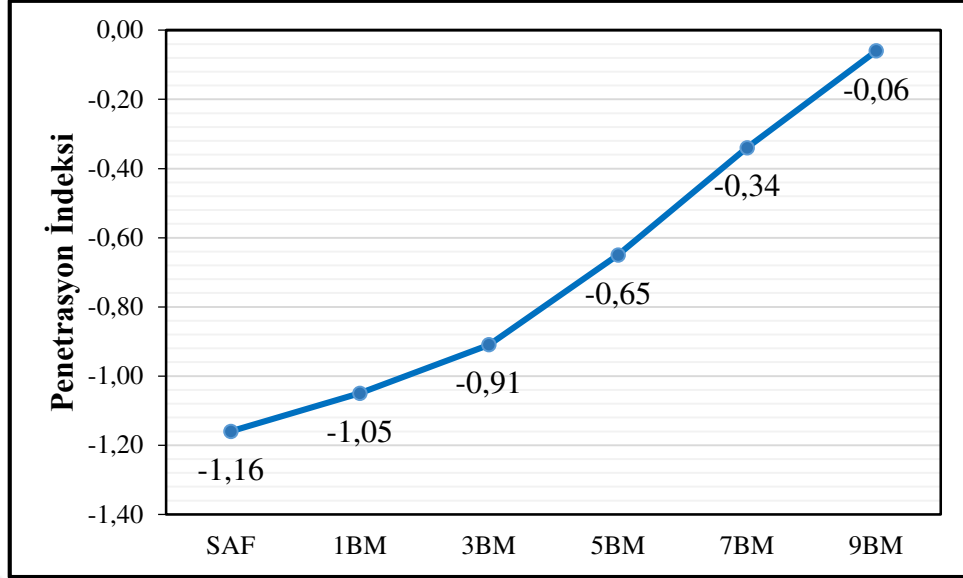


Şekil 51. Balmumu modifiyeli bitümlere ait yumuşama noktası deneyi sonuçları

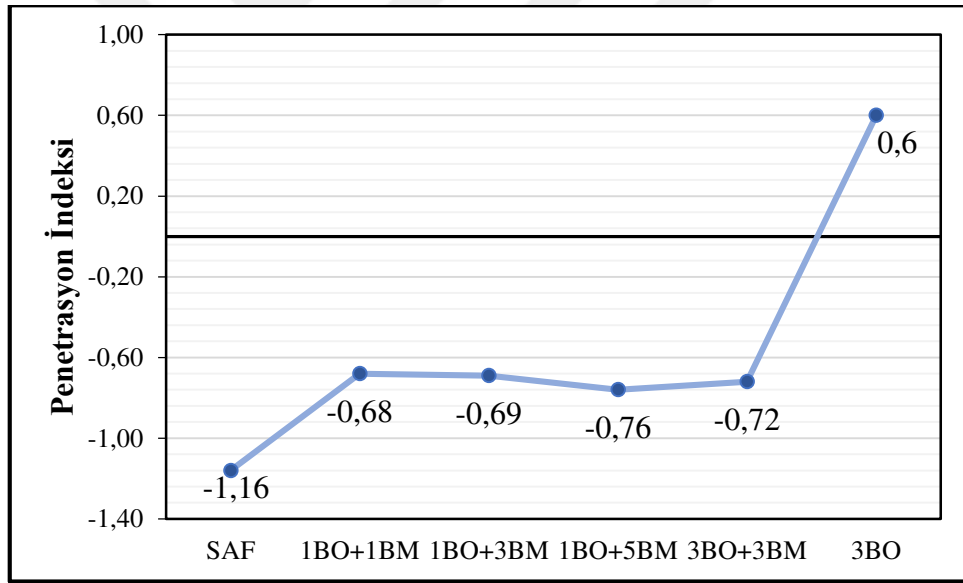


Şekil 52. Bor oksit içeren bitümlere ait yumuşama noktası deneyi sonuçları

Balmumu ve bor oksit katkılarının saf bitümün ısı duyarlılığı üzerindeki etkisini incelemek için saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden hareketle penetrasyon indeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 53 ve 54'te bu değerler grafik olarak verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, bor oksit ve balmumu saf bitüme ayrı ayrı veya birlikte eklendiğinde saf bitümün penetrasyon indeksi artmıştır. Bu durum, her iki katkının da saf bitümün ısı duyarlılığını azalttığını göstermektedir. Ancak bor oksit ve balmumunun birlikte kullanıldığı bitümlerde balmumu içeriği daha düşük olanların PI değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, bor oksitin bitümün ısı duyarlılığı üzerindeki etkisinin balmumundan çok daha belirgin ve iyileştirici olduğunu göstermektedir.



Şekil 53. Balmumu modifiyeli bitümlere ait penetrasyon indeksleri

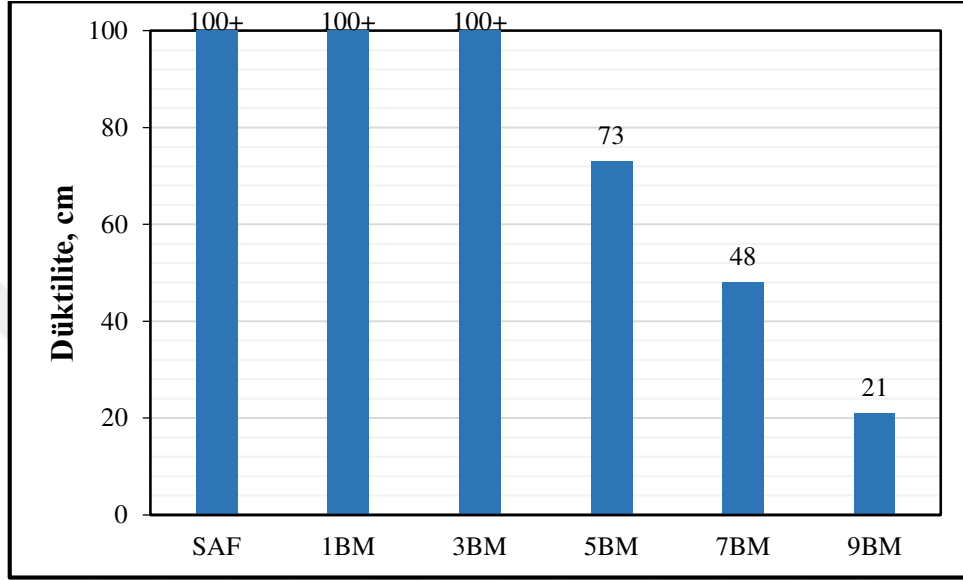


Şekil 54. Bor oksit içeren bitümlere ait penetrasyon indeksleri

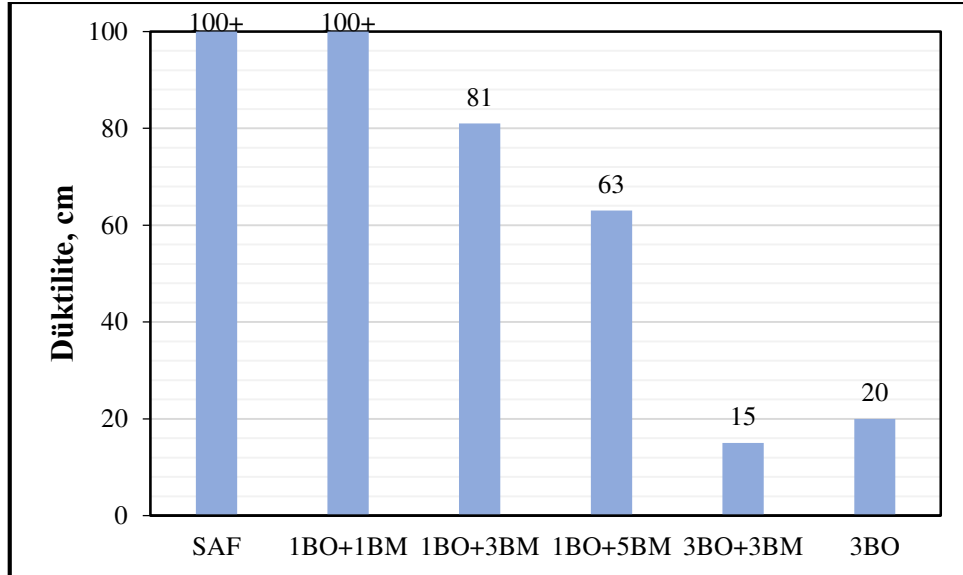
3.4. Düktilite Deneyi Sonuçları

Saf bitüm ve modifiye bitümlere uygulanan düktilite deneyi sonuçları Şekil 55 ve 56'da grafik olarak verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde saf bitüm, 1BM, 3BM ve 1BO+1BM modifiye bitümlerin düktilite değerlerinin 100 cm'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak diğer modifiye bitümlerin düktilite değerleri şartname sınırı olan 100 cm değerinin altında kalmaktadır. Bu sonuçlardan hareketle, genel olarak saf bitüme

balmumu ve/veya bor oksit ilavesinin saf bitümün uzayabilme yeteneğini azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca şartname kriterini 3BM modifiye bitüm sağlarken 3BO modifiye bitümün sağlayamaması saf bitümün uzayabilme yeteneği üzerinde bor oksitin olumsuz etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir.



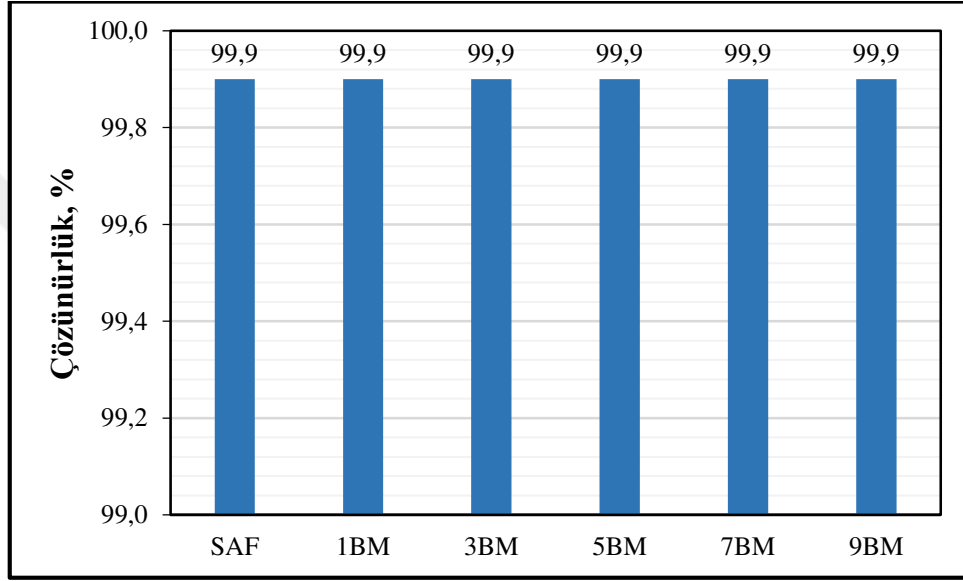
Şekil 55. Balmumu modifiyeli bitümlere ait düktilite deneyi sonuçları



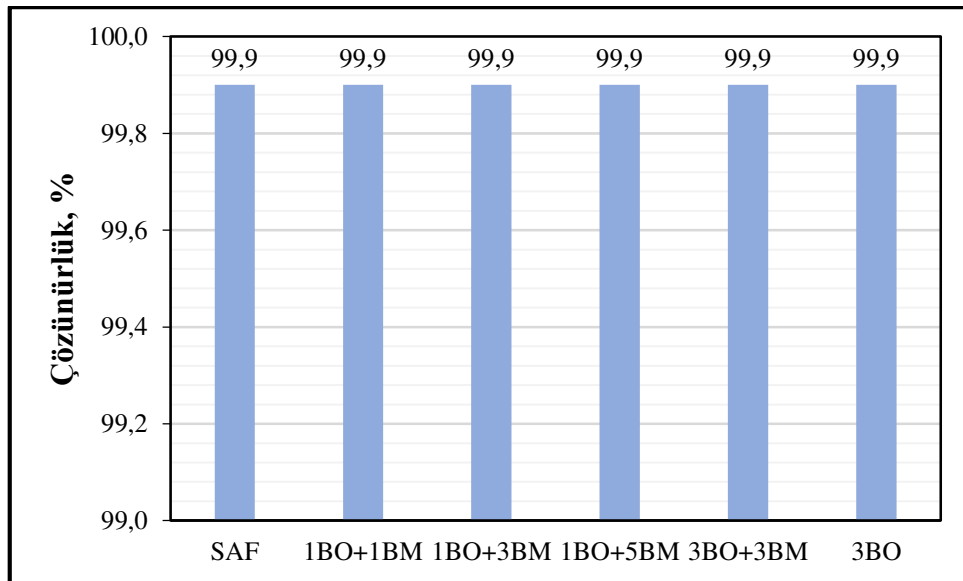
Şekil 56. Bor oksit içeren bitümlere ait düktilite deneyi sonuçları

3.5. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi Sonuçları

Trikloretilende çözünürlük deneyi sonuçları Şekil 57 ve 58’de verilmiştir. Şartname gereği bitümlerin trikloretilen içerisinde en az %99 oranında çözünmesi gerekmektedir. Şekil 57 ve 58’deki grafiklerden görüldüğü üzere saf ve bütün modifiye bitümler trikloretilen içerisinde %99.9 oranında çözünmüştür.



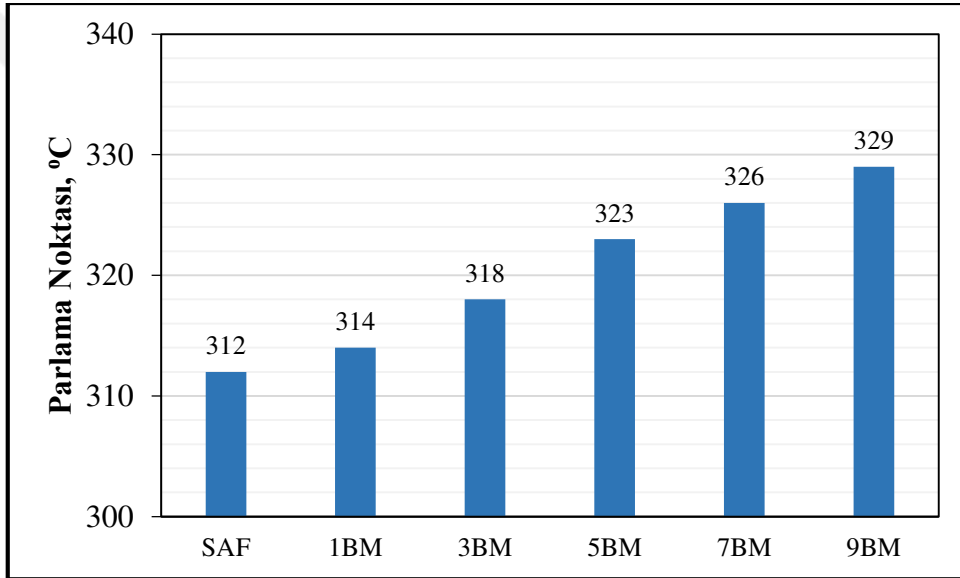
Şekil 57. Balmumu modifiyeli bitümlere ait çözünürlük deneyi sonuçları



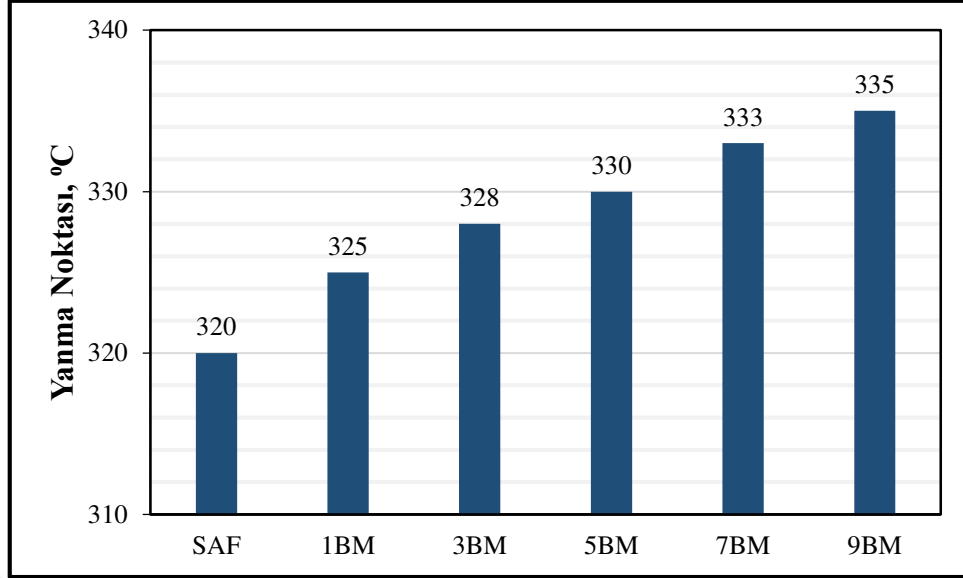
Şekil 58. Bor oksit içeren bitümlere ait çözünürlük deneyi sonuçları

3.6. Parlama ve Yanma Deneyi Sonuçları

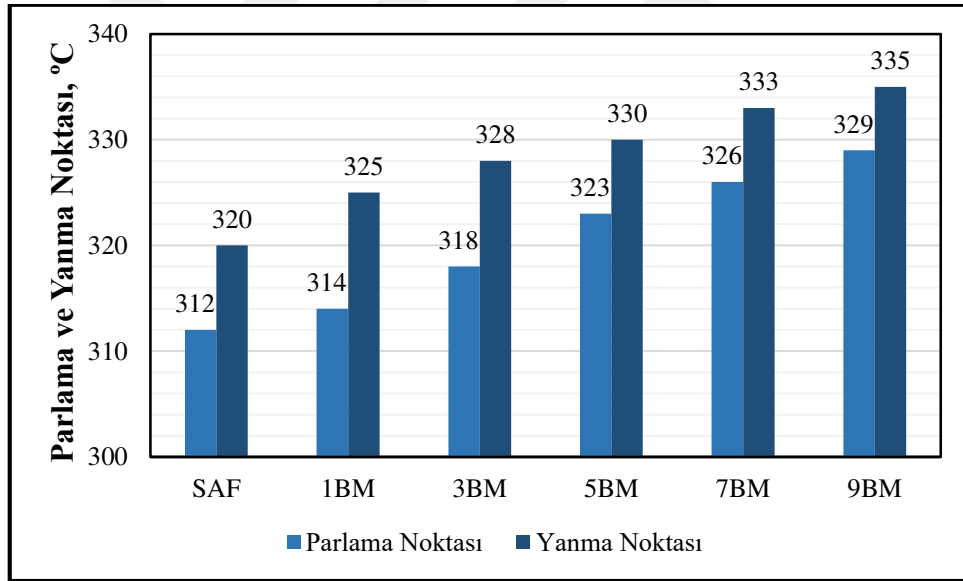
Cleveland açık kabı ile yapılan parlama ve yanma noktası deneylerine ait sonuçlar sırası ile Şekil 59 ve 60'ta ayrı ayrı olarak verilmiştir. Şekil 61'de ise parlama ve yanma noktası değerleri bir arada verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, balmumu ilavesinin saf bitümün parlama ve yanma noktası değerini arttırdığı görülmektedir. Saf ve balmumu modifiyeli bitümlerin parlama ve yanma noktası değerlerinin bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının çok üzerinde olması iş sağlığı ve güvenliği bakımından pozitif bir durum teşkil etmektedir.



Şekil 59. Balmumu modifiyeli bitümlere ait parlama noktası deneyi sonuçları



Şekil 60. Balmumu modifiyeli bitümlere ait yanma noktası deneyi sonuçları

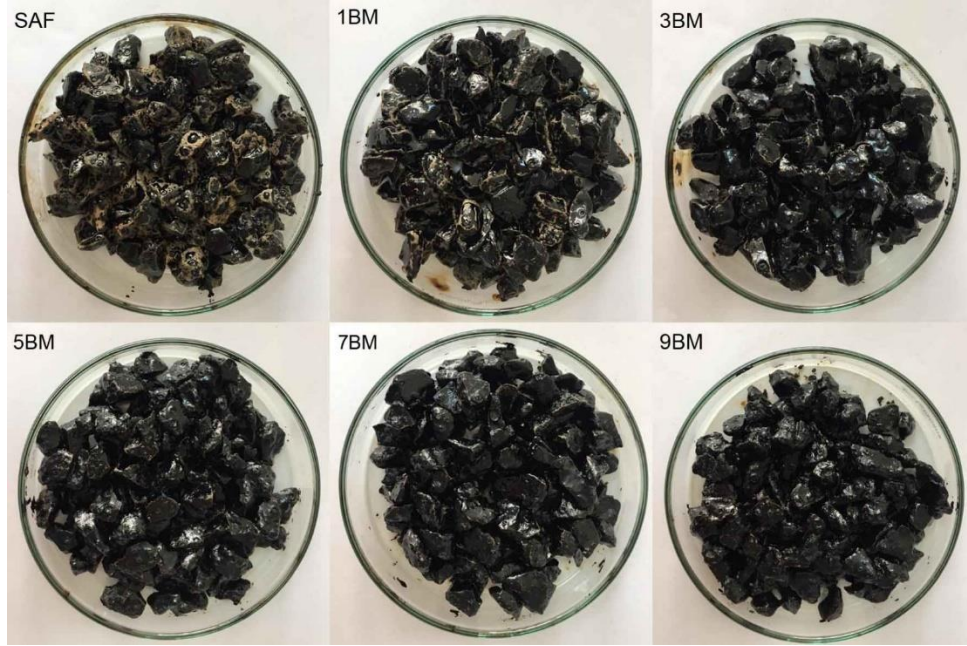


Şekil 61. Balmumu modifiyeli bitümlere ait parlama ve yanma noktası deneyi sonuçları

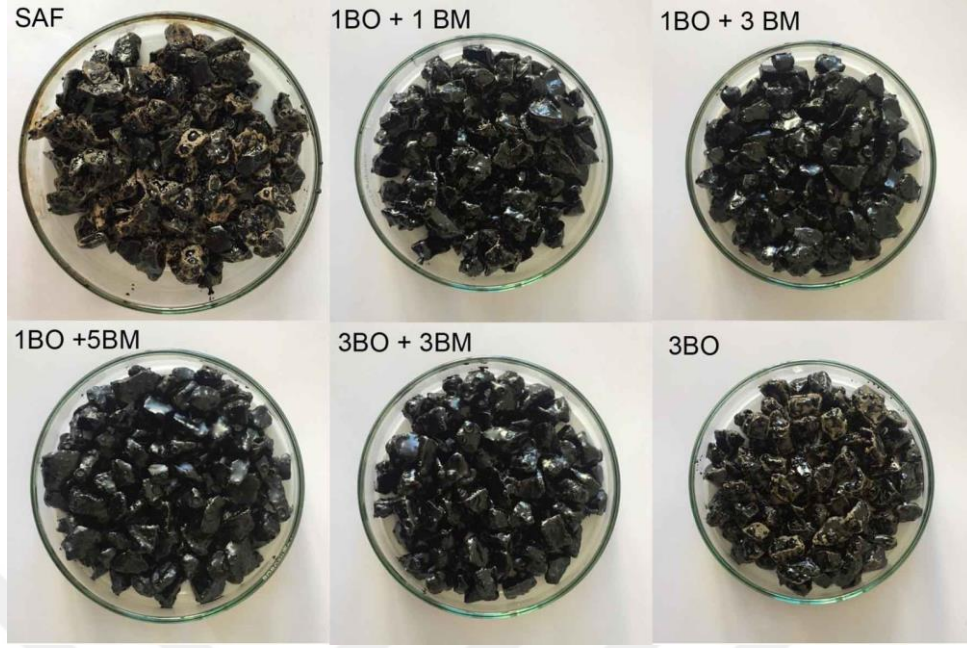
3.7. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Nicholson soyulma deneyine ait sonuçlar Şekil 62, 63 ve 64' te görsel olarak, Tablo 6 ve 7'de sayısal olarak ve Şekil 65 ve 66'da ise grafik olarak verilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi gereği soyulma direnci değerinin minimum %60 olması gerekmektedir. Şekil 65'te görüldüğü üzere saf bitüm şartname kriterini sınır değerinde sağlamaktadır. Şekil 62

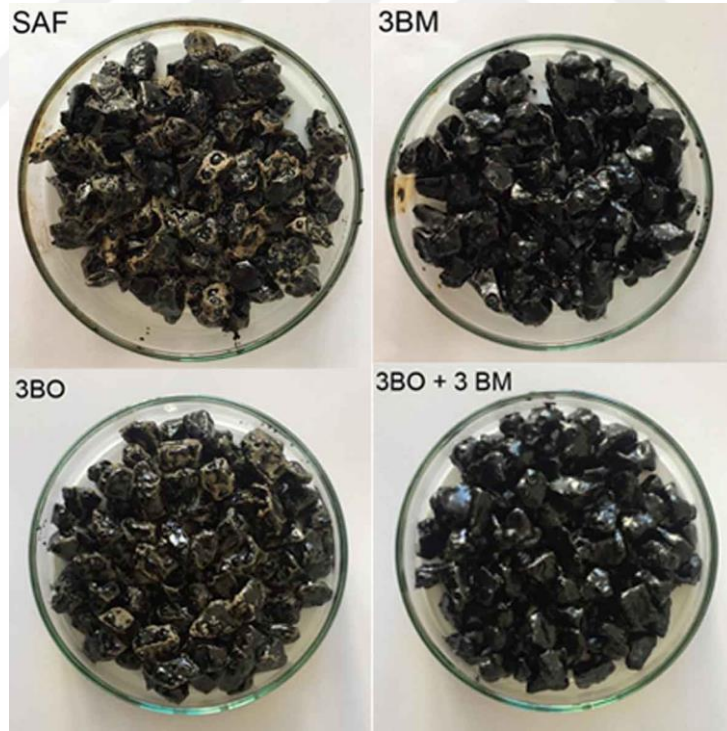
incelendiğinde, saf bitüme eklenen balmumu oranı ile paralel olarak saf bitümün soyulma direncinde çok açık bir iyileşme olduğu görülmektedir. %7 ve %9 oranında balmumu içeren bitümlerde neredeyse hiç soyulma gözlenmemiştir. Bu sonuç, balmumunun bitüme tutunmasının güçlü olduğu izlenimi vermektedir. Şekil 63 incelendiğinde ise bor oksit katkısı tek başına saf bitüme eklendiğinde saf bitümün soyulma performansı üzerinde belirgin bir etki gösterememiştir. Bu durumun bor oksitin bitüme tutunmasının zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak balmumu ve bor oksit birlikte kullanıldığında saf bitümün soyulma performansı çok açık bir şekilde artmıştır. 1BO+1BM modifiye bitümde herhangi bir soyulma gözlenmemiştir. Şekil 64 incelendiğinde, 3BO modifiye bitümün soyulma performansı saf bitüme yakinken, 3BM modifiye bitümün saf bitümden çok daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Yine Şekil 64'te görüldüğü üzere 3BO+3BM modifiye bitüm, 3BO ve 3BM modifiye bitümlerden daha iyi soyulma direnci göstermiştir. Bu sonuçlar, bor oksit ve balmumunun birlikte kullanımının saf bitümün soyulma direnci üzerinde sadece bor oksit veya balmumu kullanımından daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Bu sonuçlardan hareketle, bor oksitin balmumunun bazı fraksiyonlarına tutunmuş olabileceği ve böylelikle iki katkının birlikte kullanımının bitümün soyulma performansını etkili bir şekilde iyileştirdiği düşünülmektedir.



Şekil 62. Soyulma deneyi sonrası balmumu modifiyeli bitümlere ait görüntüler



Şekil 63. Soyulma deneyi sonrası bor oksit içeren bitümlere ait görüntüler



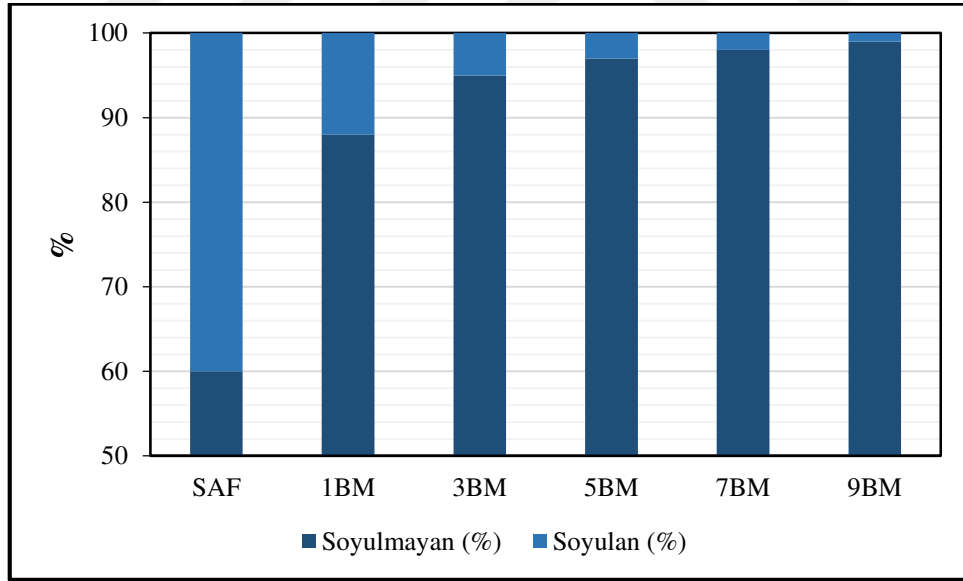
Şekil 64. Balmumu ve bor oksitin soyulma direnci üzerindeki etkilerinin kıyaslanması

Tablo 6. Balmumu modifiyeli bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları

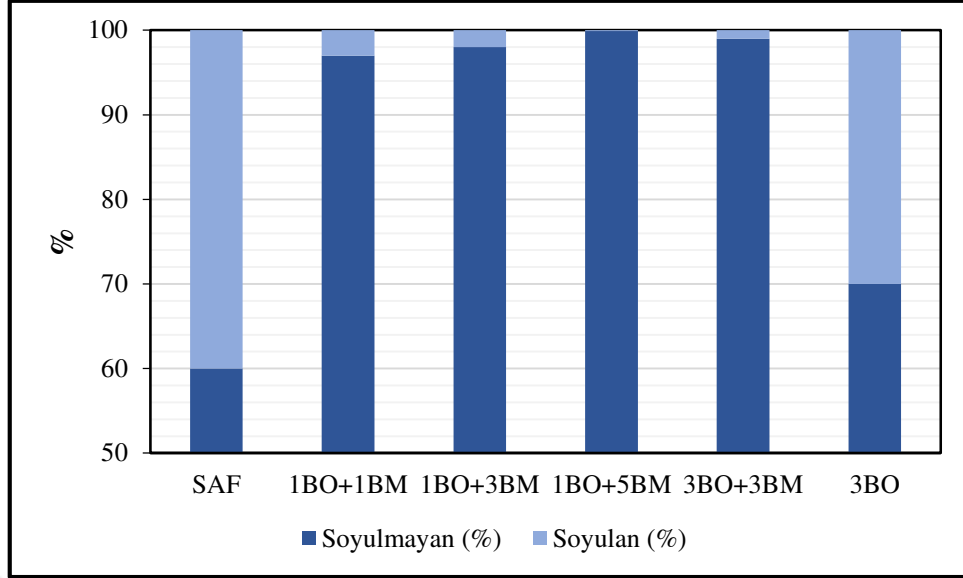
Numune Kodu	Soyulmayan, %	Soyulan, %
SAF	60	40
1BM	88	12
3BM	95	5
5BM	97	3
7BM	98	2
9M	99	1

Tablo 7. Bor oksit içeren bitümlerin Nicholson soyulma deneyi sonuçları

Numune Kodu	Soyulmayan, %	Soyulan, %
SAF	60	40
1BO+1BM	97	3
1BO+3BM	98	2
1BO+5BM	99,9	0,1
3BO+3BM	99	1
3BO	70	30



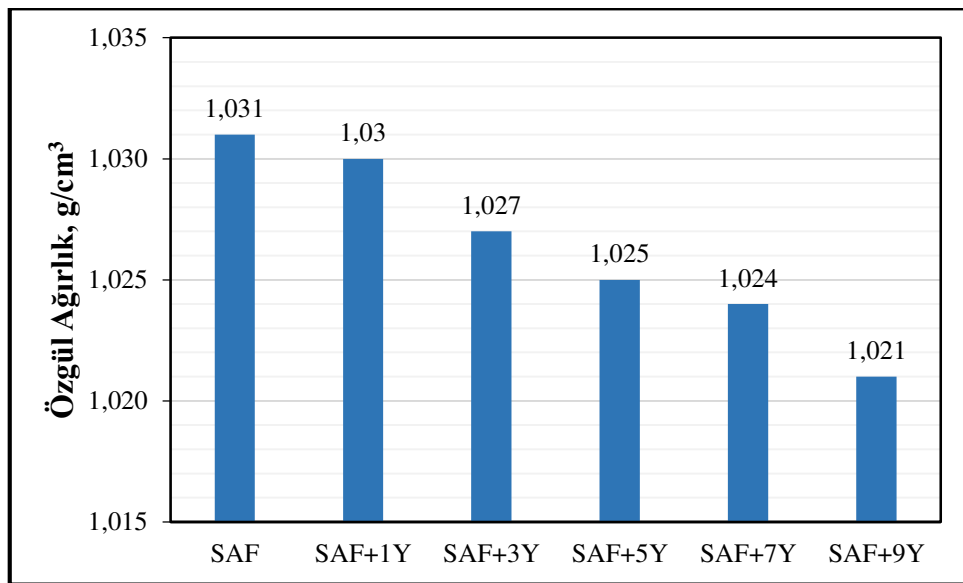
Şekil 65. Balmumu modifiyeli bitümlere ait Nicholson soyulma deneyi sonuçları



Şekil 66. Bor oksit içeren bitümlere ait Nicholson soyulma deneyi sonuçları

3.8. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Şekil 67’de özgül ağırlık deneyine ait sonuçlar grafik halinde verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere saf bitüme balmumu ilavesi ile paralel olarak saf bitümün özgül ağırlığında azalma görülmüştür. Bu sonuç, balmumunun özgül ağırlığının saf bitümün özgül ağırlığından daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 67. Balmumu modifiyeli bitümlere ait özgül ağırlık deneyi sonuçları

3.9. RV Deneyi Sonuçları

Saf ve modifiye bitümlere 120 °C, 135 °C, 165 °C ve 180°C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmıştır. RV deneyi ile elde edilen viskozite değerleri Tablo 8, 9, Şekil 68 ve 69’da verilmiştir. 135 °C sıcaklıktaki viskozite değerleri incelendiğinde, bütün numunelere ait viskozite değerlerinin şartname üst sınırı 3000 cP değerinden düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, hazırlanan modifiye bitümlerin uygulama sırasında işlenebilirlik performansının yeterli olacağını göstermektedir.

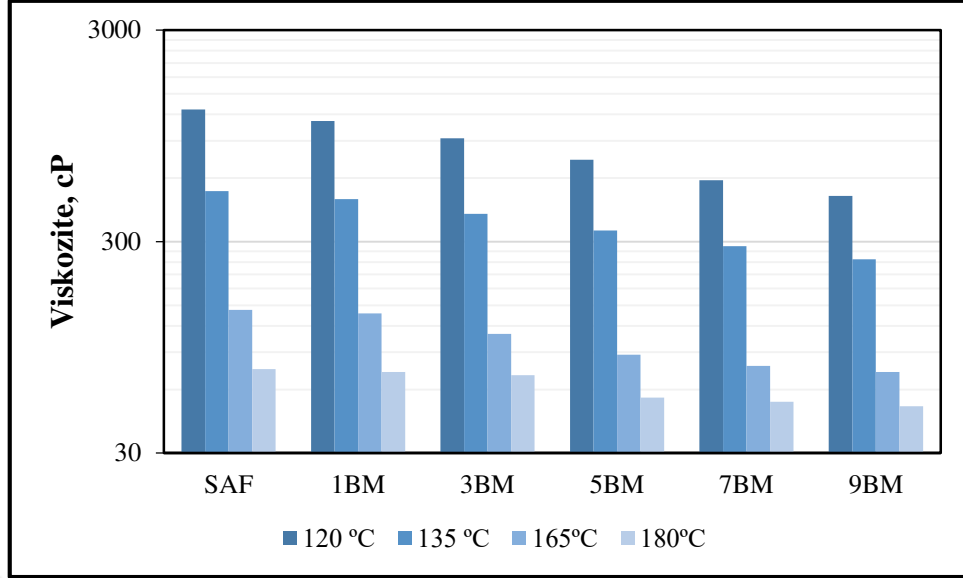
Tablo 8. Balmumu modifiyeli bitümlere ait RV deneyi sonuçları, cP

Numune Kodu	Sıcaklıklar (°C)			
	120	135	165	180
SAF	1266	520	142,5	75
1BM	1118	476,7	137,5	72,5
3BM	924,2	405,8	110	70
5BM	733,3	338,3	87,5	55
7BM	586,7	285,8	77,5	52,5
9BM	493,3	247,5	72,5	50

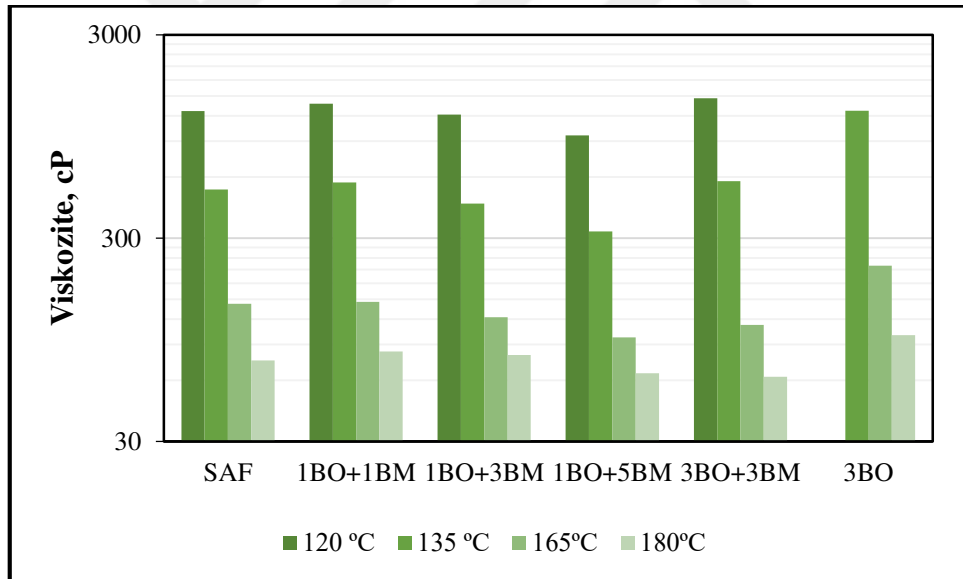
Tablo 9. Bor oksit içeren bitümlere ait RV deneyi sonuçları, cP

Numune Kodu	Sıcaklıklar (°C)			
	120	135	165	180
SAF	1266	520	142,5	75
1BO+1BM	1373,7	564,2	145,8	83,3
1BO+3BM	1215	444,2	122,5	80
1BO+5BM	959,2	324,2	97,5	65
3BO+3BM	1460,3	572,5	112,5	62,5
3BO	EEE*	1268,7	220	100

*21 numaralı mil ile RV deneyi yapılan sıcaklıkta elde edilen viskozite değerinin cihazın ölçüm kapasitesinin üzerinde olduğunu belirtmektedir.



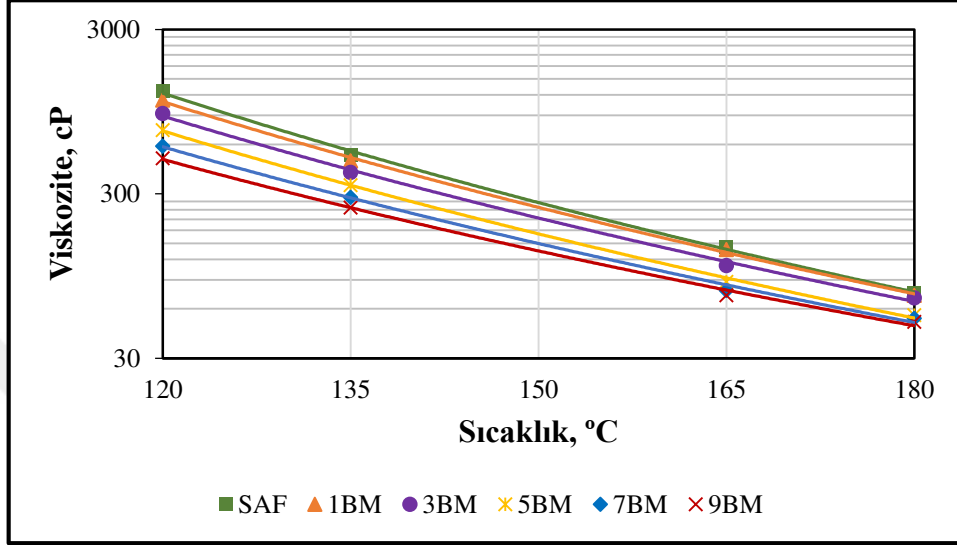
Şekil 68. Balmumu modifiyeli bitümlere 120, 135, 165 ve 180 °C’de uygulanan RV deneyi sonuçları



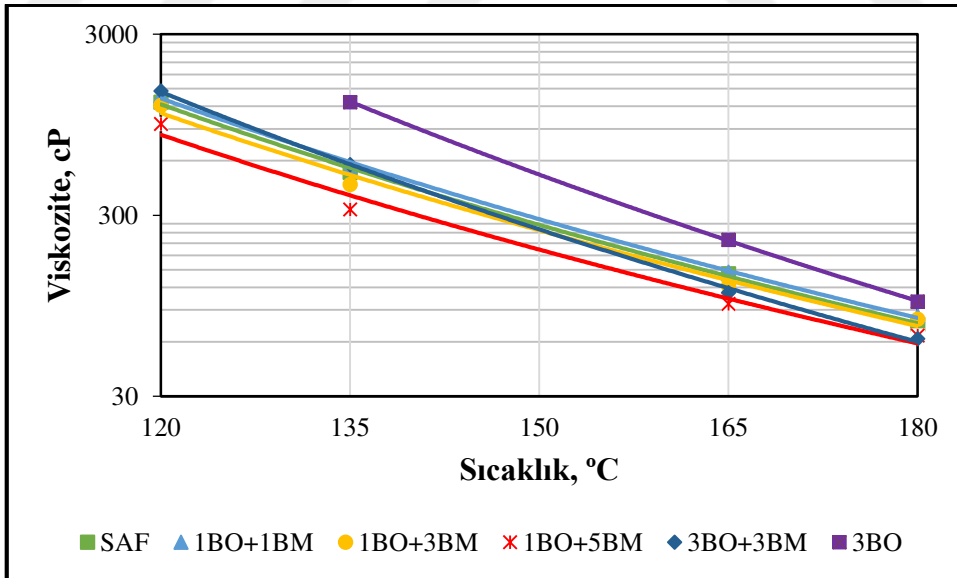
Şekil 69. Bor oksit içeren bitümlere 120, 135, 165 ve 180 °C’de uygulanan RV deneyi sonuçları

RV deneyi ile elde edilen viskozite değerlerinden hareketle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu amaçla Şekil 70 ve 71’de verilen sıcaklık-viskozite grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler üzerinde 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri belirlenmiştir. 170 ± 20 cP değerlerine karşılık gelen sıcaklıklar karıştırma sıcaklıklarını ve 280 ± 30 cP değerlerine karşılık gelen sıcaklıklar ise sıkıştırma sıcaklıklarını

ifade etmektedir. Belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 10 ve 11’de verilmiştir. Şekil 72 ve 73’te ise karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının alt ve üst değerlerinin ortalaması alınarak ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları verilmiştir.



Şekil 70. Balmumu modifiyeli bitümlere ait sıcaklık-viskozite grafiği



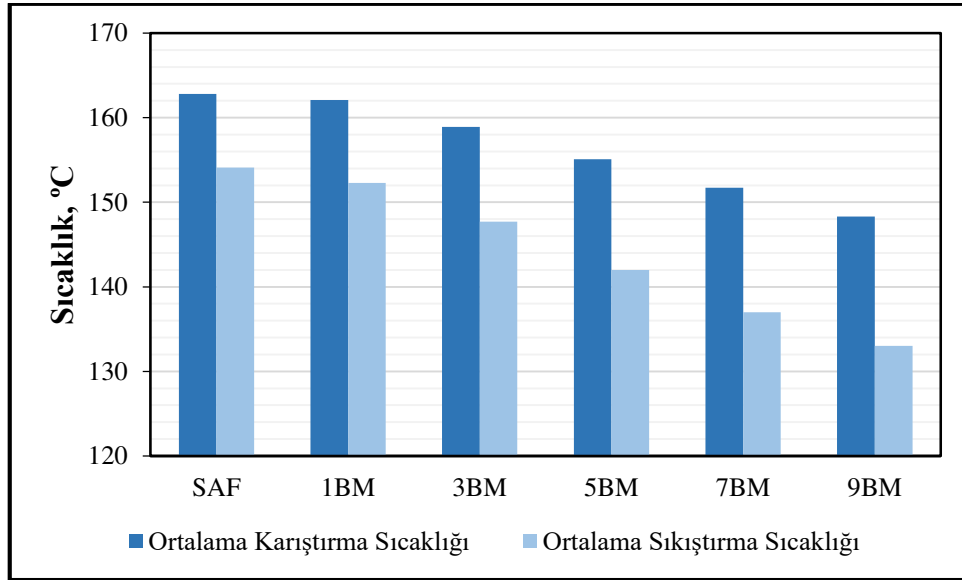
Şekil 71. Bor oksit içeren bitümlere ait sıcaklık-viskozite grafiği

Tablo 10. Balmumu modifiyeli bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

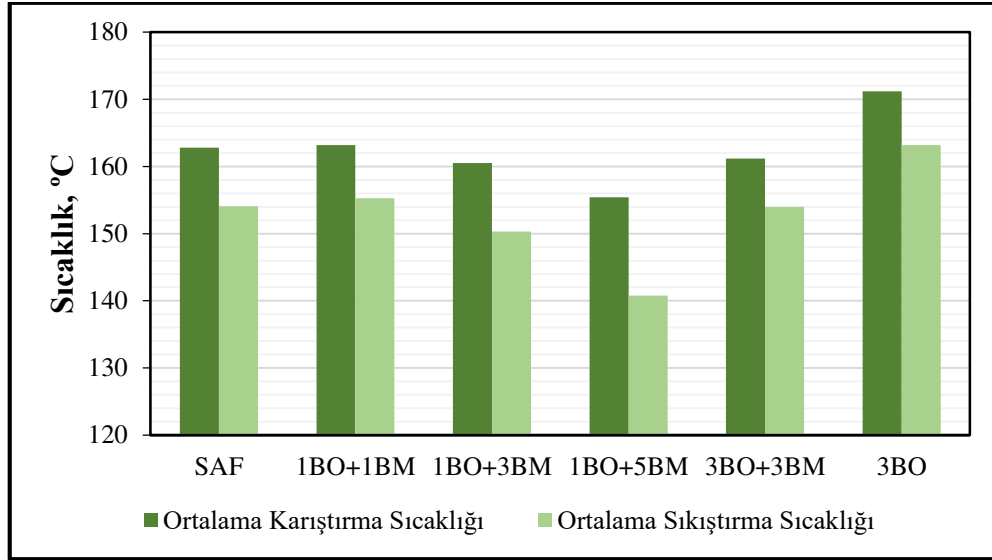
Numune Kodu	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)
SAF	161,2-164,4	151,7-156,5
1BM	160,4-163,9	149,7-155
3BM	156,9-160,9	144,7-150,8
5BM	152,7-157,5	138,4-145,6
7BM	148,8-154,6	133,8-140,2
9BM	144,9-151,7	131,2-134,8

Tablo 11. Bor oksit içeren bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Numune Kodu	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)
SAF	161,2-164,4	151,7-156,5
1BO+1BM	161,8-164,7	153,2-157,5
1BO+3BM	158,7-162,4	147,5-153,1
1BO+5BM	152,8-158	136,9-144,8
3BO+3BM	159,9-162,5	152,1-156
3BO	168,7-173,7	162,4-164,1



Şekil 72. Balmumu modifiyeli bitümlerin ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

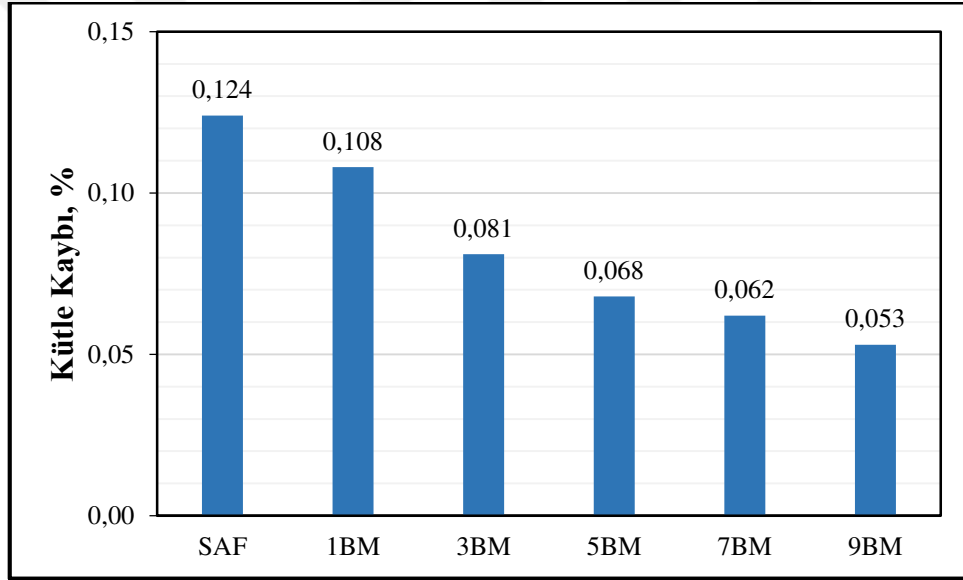


Şekil 73. Bor oksit içeren bitümlerin ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

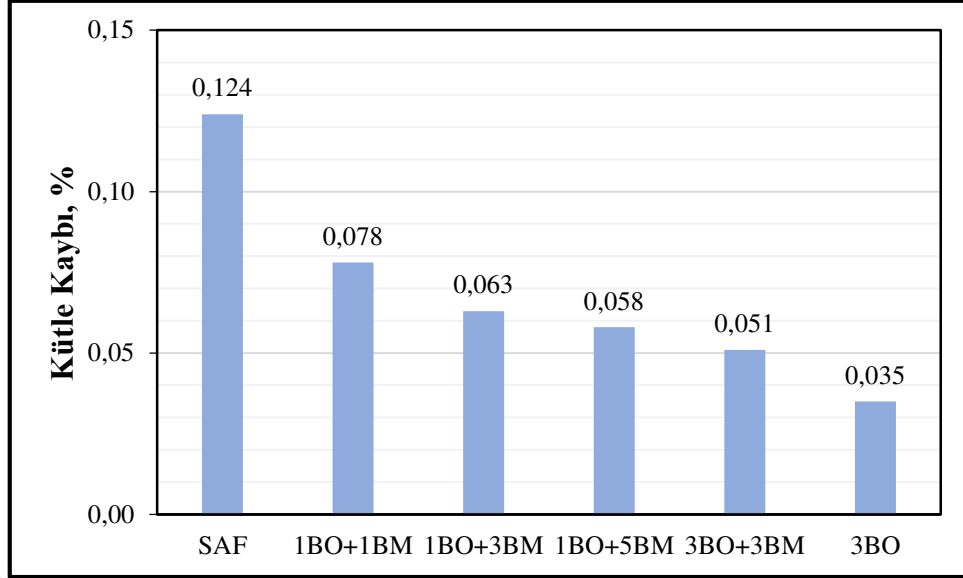
RV deneyine ait bulgular, balmumunun saf bitümün işlenebilirlik performansını artırarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını azalttığını göstermektedir. Balmumu oranındaki artışla paralel olarak bitümün işlenebilirliği artmış ve böylelikle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları azalmıştır. Şekil 72 incelendiğinde, saf bitüme %9 oranında balmumu eklenmesi ile saf bitümün karıştırma sıcaklığında yaklaşık 15, sıkıştırma sıcaklığında ise 21 °C azalma görülmektedir. Diğer yandan saf bitüme bor oksit eklenmesi ile saf bitümün işlenebilirlik performansı azalmıştır. Şekil 73'te görüldüğü üzere saf bitüme %3 oranında bor oksit eklenmesi saf bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını yaklaşık 9 °C arttırmıştır. Bor oksit ve balmumu bir arada kullanıldığında ise 1BO+1BM ve 3BO+3BM modifiye bitümler işlenebilirlik performansı bakımından saf bitümle benzer sonuçlar vermiştir. 1BO+3BM modifiye bitümün Şekil 73'te verilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde saf bitüme kıyasla sırası ile yaklaşık 2-4 °C azalma görülmektedir. 1BO+5BM modifiye bitüm ise saf bitüme kıyasla yaklaşık 8 °C daha az karıştırma sıcaklığına ve 13°C daha az sıkıştırma sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır. Bu sonuçlardan hareketle, sadece balmumu veya balmumunu oransal olarak bor oksitten daha fazla içeren bitümlerin saf bitüme kıyasla enerji kaybının daha az olacağı ve daha az karbon emisyonuna sebep olarak çevreye verilen zararı azaltabileceği düşünülmektedir. Bor oksitin ise katkı olarak tek başına kullanımının saf bitümden daha fazla karbon emisyonuna sebebiyet vereceği beklendiğinden balmumu ile bir arada kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

3.10. RTFOT Sonuçları

RTFOT sonrasında hesaplanan kütle kayıpları Şekil 74 ve 75'te verilmiştir. Superpave şartnamesine göre RTFOT sonrası hesaplanan kütle kayıplarının %1'i geçmemesi gerekmektedir. Şekil 74 ve 75'te verilen grafik incelendiğinde bütün numunelerin şartname sınırını aşmadığı görülmektedir. Saf bitüme balmumu ve/veya bor oksit ilavesi ile bitümde görülen kütle kaybı azalmıştır. Ayrıca 3BM, 3BO+3BM ve 3BO modifiye bitümlerde saf bitüme kıyasla sırası ile %12.9, %58.9 ve %71.8 daha az kütle kaybı yaşanmıştır. Bu sonuçtan hareketle, her iki katkının da saf bitümün kısa dönemli yaşlanmaya karşı direncini arttırdığı ancak bor oksitin balmumundan daha baskın etki gösterdiği düşünülmektedir.

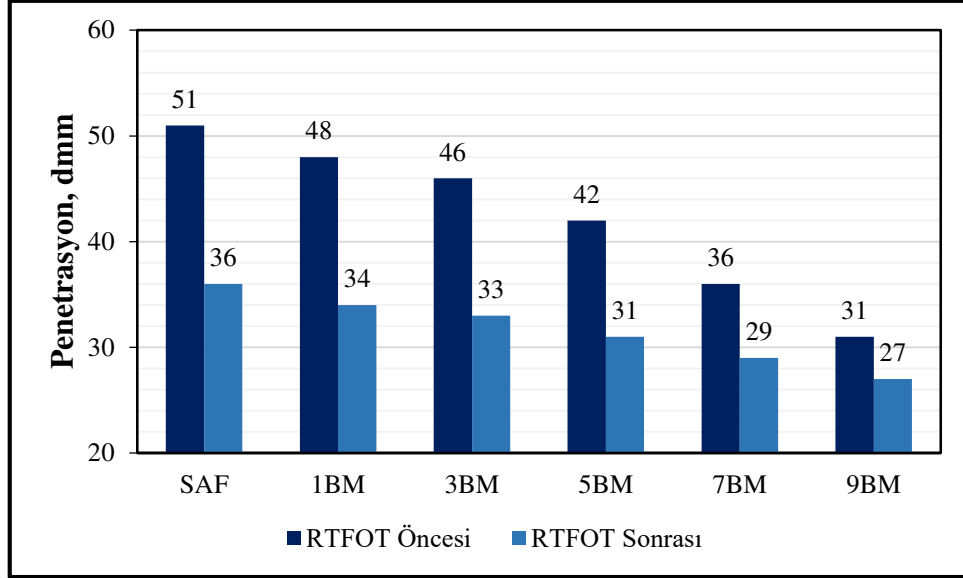


Şekil 74. Balmumu modifiyeli bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıpları

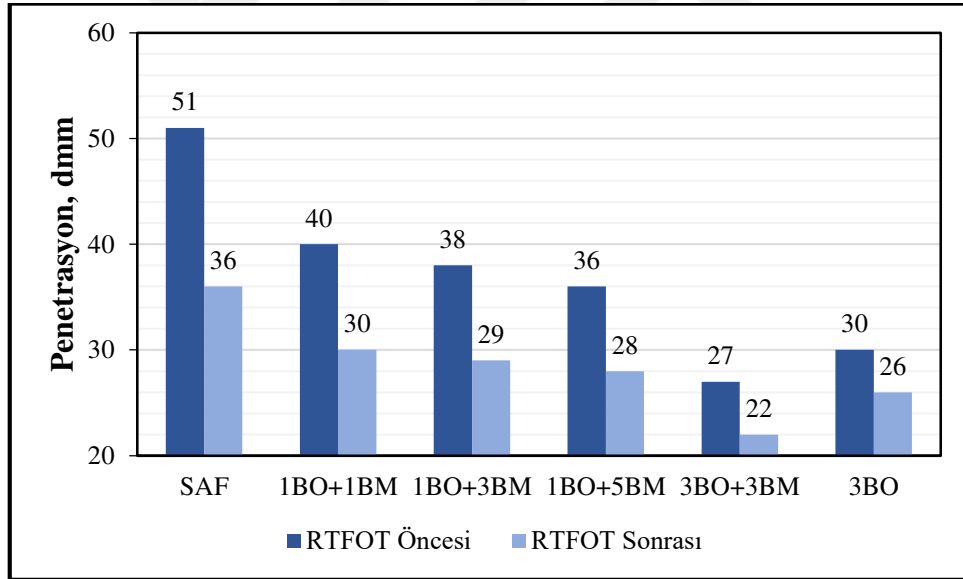


Şekil 75. Bor oksit içeren bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıpları

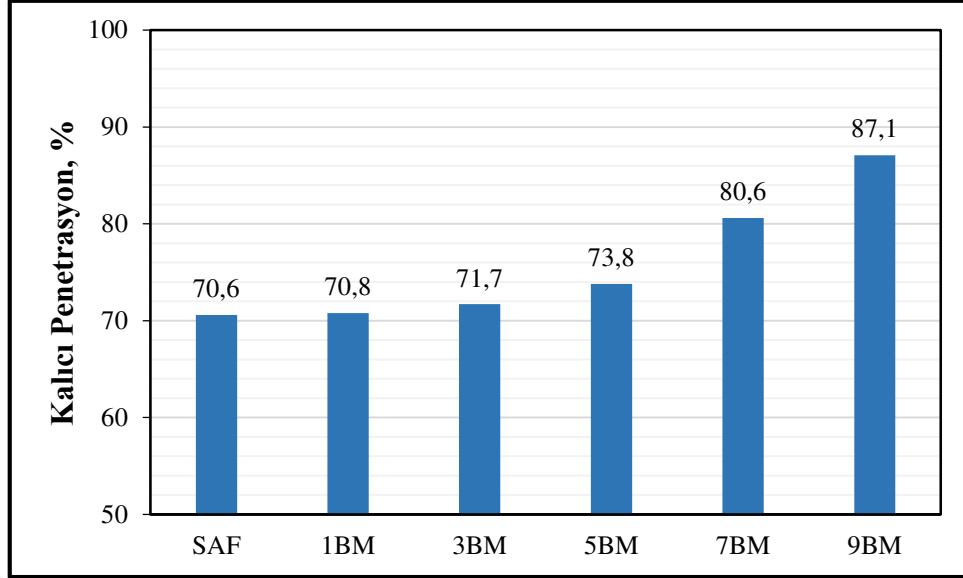
Kısa dönemli yaşlanmanın fiziksel özellikler üzerindeki etkisini gözlemlemek için saf ve modifiye bitüm numunelerine RTFOT sonrasında penetrasyon deneyi uygulanmış ve sonuçlar RTFOT öncesi penetrasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelere ait RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri Şekil 76 ve 77’de verilmiştir. Bu değerlerden hareketle saf ve modifiye bitümler için kalıcı penetrasyon yüzdeleri hesaplanarak Şekil 78 ve 79’da verilmiştir. Şekil 76 ve 77’de görüldüğü üzere RTFOT öncesi ile benzer olarak en yüksek penetrasyon değerine saf bitüm ve en düşük penetrasyon değerine 3BO+3BM modifiye bitüm sahiptir. Şekil 78’de verilen kalıcı penetrasyon yüzdeleri incelendiğinde ise saf bitüme kıyasla balmumu ilavesi ile paralel olarak kalıcı penetrasyon yüzdelerinin arttığı görülmektedir. Şekil 78 ve 79 birlikte incelendiğinde ise balmumu ve bor oksit katkılarının birlikte kullanımında aynı oranda sadece balmumu içeren bitümlere göre kalıcı penetrasyon yüzdelerinin daha da arttığı görülmektedir. Bütün bitümler arasında en yüksek kalıcı penetrasyon yüzdesini 3BO modifiye bitüm göstermiştir. Bu sonuçlardan hareketle, balmumu ve boroksit katkılarının saf bitümün kısa dönemli yaşlanmaya karşı direncini arttırdığı ve bor oksitin iyileştirici etkisinin daha belirgin olduğu düşünülmektedir.



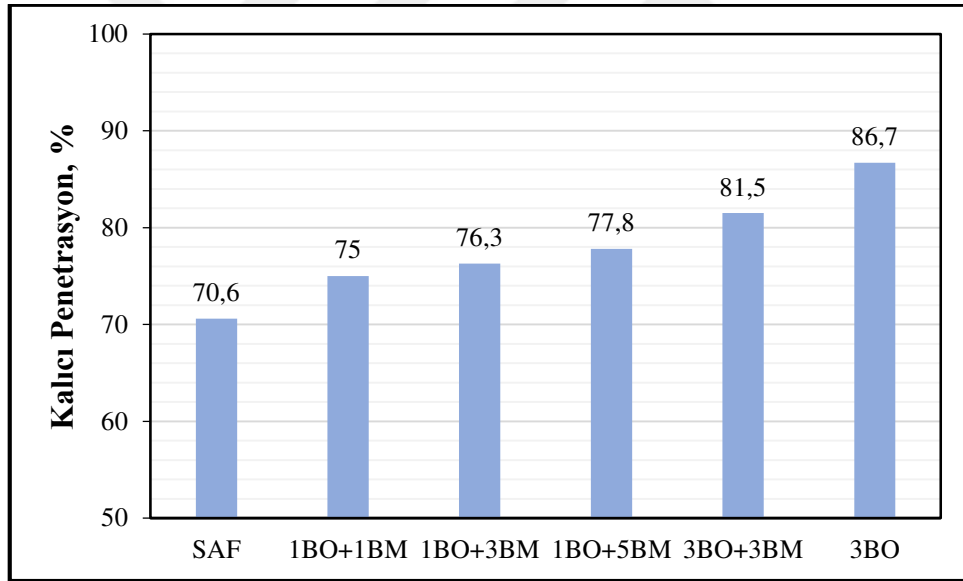
Şekil 76. Balmumu modifiyeli bitümlere ait RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri



Şekil 77. Bor oksit içeren bitümlere ait RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon değerleri



Şekil 78. Balmumu modifiyeli bitümlere ait kalıcı penetrasyon yüzdeleri



Şekil 79. Bor oksit içeren bitümlere ait kalıcı penetrasyon yüzdeleri

3.11. DSR Deneyi Sonuçları

3.11.1. Yaşlandırılmamış Bağlayıcılara Ait DSR sonuçları

Yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümlere uygulanan DSR deneylerine ait sonuçlar Tablo 12 ve 13'te verilmiştir. DSR deneyi uygulanırken, her numune için 64 °C sıcaklıkta

deneye başlanmıştır ve $G^*/\sin\delta$ değerinin Superpave şartname alt sınırı 1000 kPa değerini sağlaması durumunda bir üst sıcaklığa geçilmiştir. Şartname sınırı sağlanmadığında ise bir alt sıcaklığa geçilmiştir. Superpave performans sınıflandırmasında bir alt veya bir üst sınıf arasındaki fark 6° C'dir.

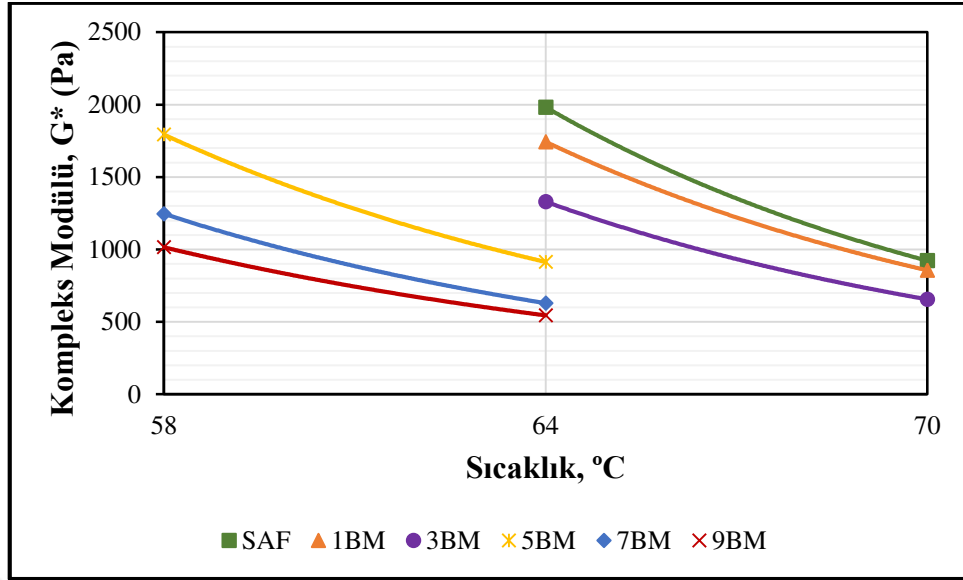
Tablo 12. Balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (ASTMD6373)
SAF	64	1982,4	84,10	1993	1000 Minimum
	70	922,6	85,84	925	
1BM	64	1743,3	84,30	1752	
	70	855,9	86,04	858	
3BM	64	1329,7	84,88	1335	
	70	655,6	86,28	657	
5BM	58	1793,1	83,99	1803	
	64	913,8	85,22	917	
7BM	58	1245,5	84,63	1251	
	64	629,1	85,57	631	
9BM	58	1015,1	83,86	1021	
	64	544,9	85,02	547	

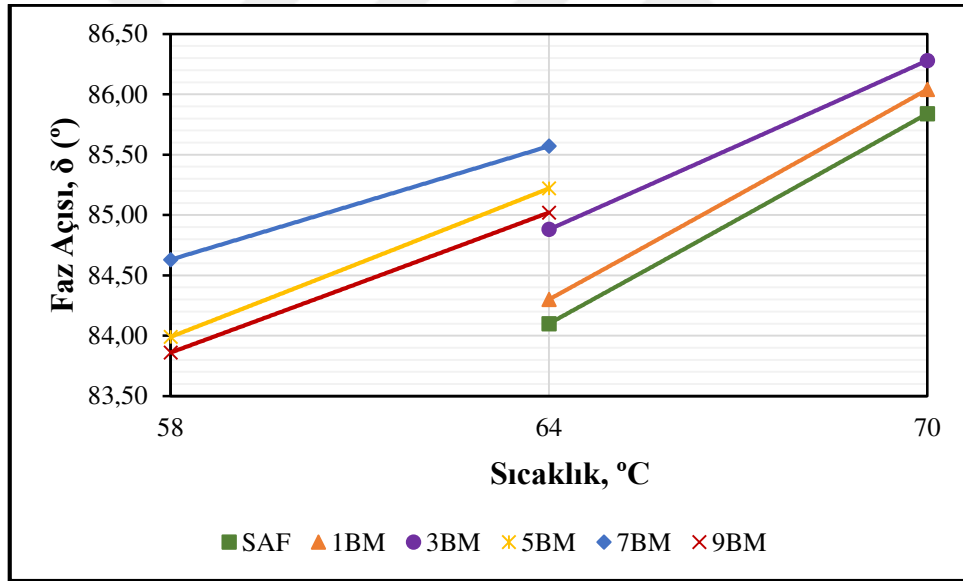
Tablo 13. Bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (ASTMD6373)
SAF	64	1982,4	84,10	1993	1000 Minimum
	70	922,6	85,84	925	
1BO+1BM	64	2715,3	81,15	2748	
	70	1317,3	82,71	1328	
	76	664	83,75	668	
1BO+3BM	64	1414,6	83,79	1423	
	70	668,8	85,37	671	
1BO+5BM	64	1156,7	84,02	1163	
	70	576,5	85,81	578	
3BO+3BM	64	2582,9	78,17	2639	
	70	1263,7	80,05	1283	
	76	639	81,56	646	
3BO	64	9018,3	70,74	9553	
	70	4205	73,09	4395	
	76	2146,5	75,22	2220	
	82	1160,5	77,22	1190	

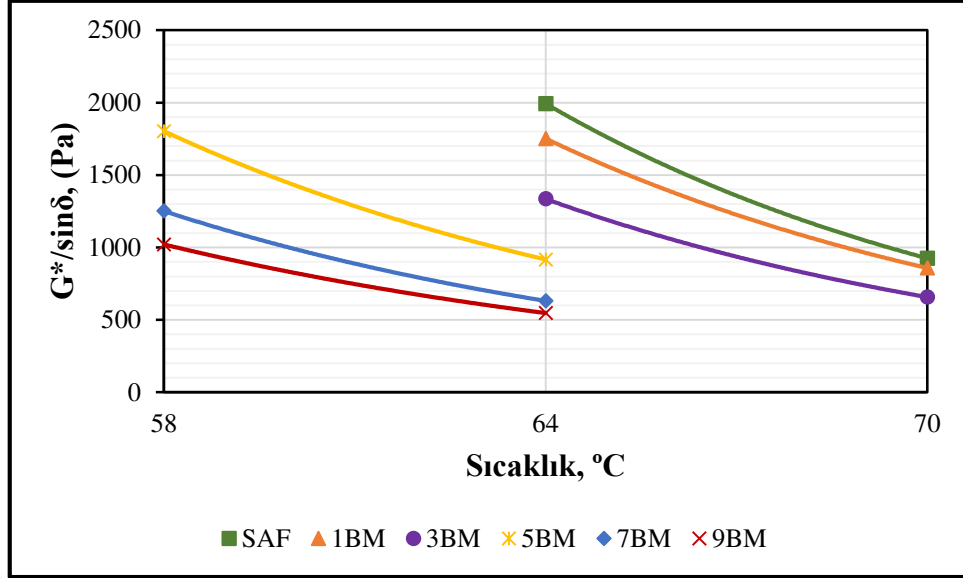
Saf ve balmumu modifiyeli bitümlere ait G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ değerleri sırası ile Şekil 80, 81 ve 82’de grafikler halinde verilmiştir. Şekil 80 incelendiğinde, saf bitüme balmumu eklenmesi ile saf bitümün G^* değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda saf bitümün balmumu modifiyeli bitümlere göre daha rijit davrandığını göstermektedir. Şekil 81 incelendiğinde, saf bitüme balmumu eklenmesi ile saf bitümün δ değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum, saf bitümün balmumu modifiyeli bitümlere kıyasla daha elastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 82’de verilen $G^*/\sin\delta$, tekerlek izi parametresi, değerleri incelendiğinde ise saf bitüme balmumu eklenmesi ile saf bitümün $G^*/\sin\delta$ değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, balmumunun saf bitümün tekerlek izi direnci üzerinde olumsuz bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda balmumunun tekerlek izi üzerindeki bu olumsuz etkisi geleneksel bitüm deneylerinden elde edilen sonuçlar ile çelişmektedir. Penetrasyon deneyinde balmumunun saf bitümde fiziksel sertleşmeye yol açtığı, yumuşama noktası ve penetrasyon indekslerinde ise balmumunun saf bitümün ısı duyarlılığını azalttığı görülmüştür. Ancak bu sonuçlar DSR deney sonuçlarına yansımamıştır. Bu sonucun balmumunun kimyasal yapısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Zira bitümdeki sertleşmenin balmumu katkısı elde edilirken balmumundaki aşırı yumuşamaya yol açan bazı uçucu bileşenlerin uzaklaştırılmış olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bununla birlikte, DSR deneyinden elde edilen sonuçlara göre, balmumundan elde edilen monoester ağırlıklı katkının polar gruplar ve kısa zincirli fraksiyonlarının yüksek olması sonucu bitüme eklendiğinde bitümde fiziksel bir sertleşmeye sebep olduğu ancak katkının bitümün uzun hidrokarbon zincirleri ile örtüşmesinin (elektrostatik etki) zayıf olması sonucu tekerlek izi performansı üzerinde olumsuz etki gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 80. Balmumu modifiyeli bitümlerin kompleks kayma modülleri

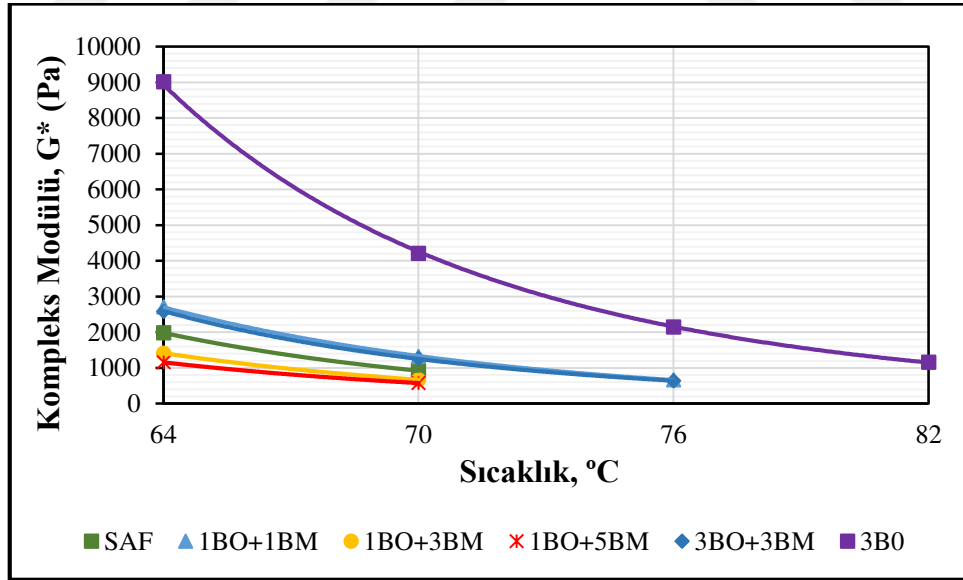


Şekil 81. Balmumu modifiyeli bitümlere ait faz açıları

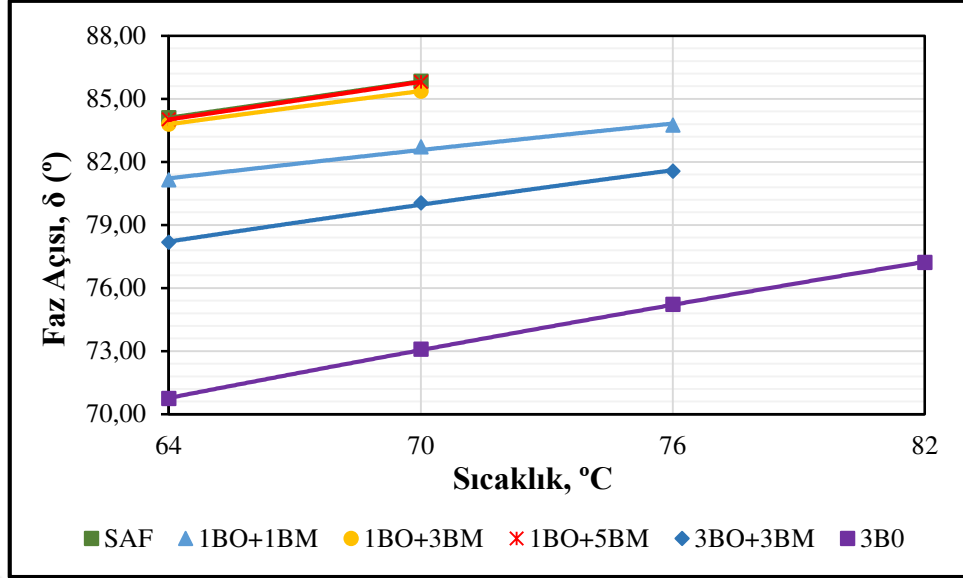


Şekil 82. Balmumu modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri

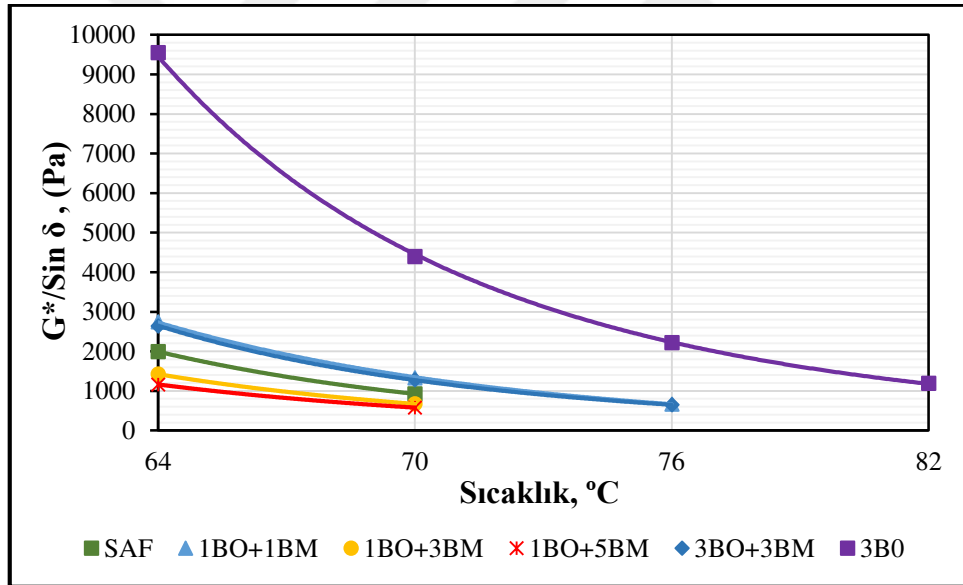
Saf bitüm ve bor oksit içeren bitümlere ait G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ değerleri sırası ile şekil 83, 84 ve 85’te verilmiştir.



Şekil 83. Bor oksit modifiyeli kompleks kayma modülleri



Şekil 84. Bor oksit içeren bitümlere ait faz açıları



Şekil 85. Bor oksit modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri

Şekil 83 incelendiğinde 1BO+1BM, 3BO+3BM ve 3BO modifiye bitümlerin saf bitüme kıyasla daha yüksek G^* değerine sahip olduğu görülmektedir. Bütün numuneler arasında en yüksek G^* değerine 3BO modifiye bitüm sahiptir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda bütün numunelere kıyasla 3BO modifiye bitümün daha rijit davranış sergilediğini göstermektedir. 1BM ve 3BM modifiye bitümler saf bitümden daha düşük G^* değerine sahipken, 1BO+1BM ve 3BO+3BM modifiye bitümlerin saf bitümden daha yüksek

G* değerine sahip olması bor oksitin balmumunun rijitliğini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. 1BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümlerin G* değerleri saf bitümden daha düşük olmakla birlikte, 3BM ve 5BM modifiye bitümlerden daha yüksektir. Bu durum yine bor oksitin sertleştirici etkisini göstermektedir ancak balmumu içeriği yüksek olduğundan saf bitümün rijitliğinde az da olsa bir azalma görüldüğü düşünülmektedir.

Şekil 84 incelendiğinde, bor oksit içeren bütün bitümlerin saf bitüme kıyasla daha düşük δ değerlerine sahip olduğu ve en düşük değerleri 3BO modifiye bitümün gösterdiği görülmektedir. Bu sonuç, bor oksitin yüksek sıcaklıklarda saf bitümün elastikiyetini arttırdığını ve bu etkinin çok belirgin olduğunu göstermektedir.

Şekil 85 incelendiğinde ise saf bitüme kıyasla 1BO+1BM, 3BO+3BM ve 3BO modifiye bitümlerin daha yüksek $G^*/\sin\delta$ değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek değerlere 3BO modifiye bitümün sahip olması, bor oksitin tekerlek izi direnci üzerinde belirgin bir iyileştirici etkisinin olduğunu göstermektedir. 1BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümler saf bitümden daha düşük ve sırası ile 3BM ve 5BM modifiye bitümlerden daha yüksek tekerlek izi dayanım parametresine sahiptir. Bu sonuçtan hareketle, bor oksitin tekerlek izi direnci üzerinde iyileştirici bir etkisinin olduğu ancak balmumu katkı oranının bor oksitten daha fazla olması sebebi ile saf bitüme kıyasla daha az dayanım gösterdiği düşünülmektedir.

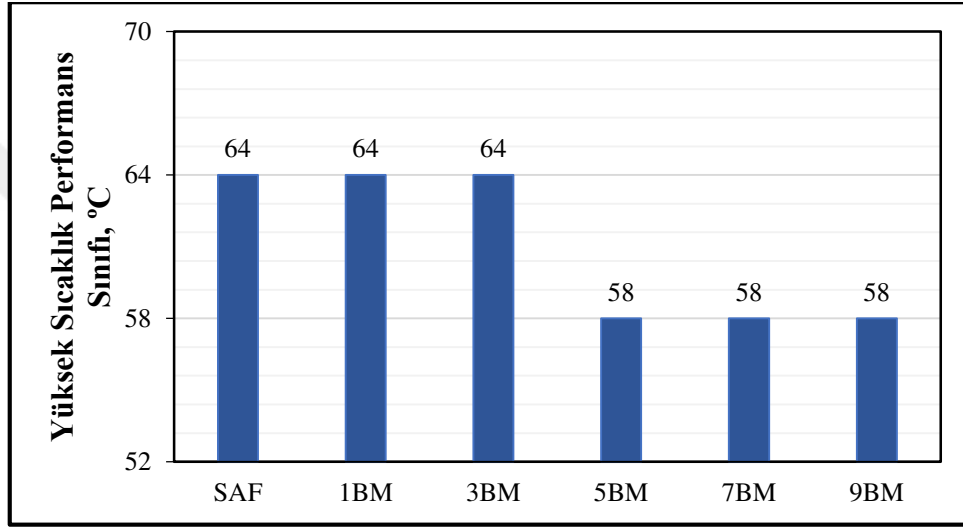
Saf ve modifiye bitümlerin tekerlek izi parametreleri dikkate alınarak yüksek sıcaklık performans sınıfları belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları Tablo 14, 15, Şekil 86 ve 87’de verilmiştir.

Tablo 14. Balmumu modifiyeli bitümlere ait yüksek sıcaklık performans sınıfları

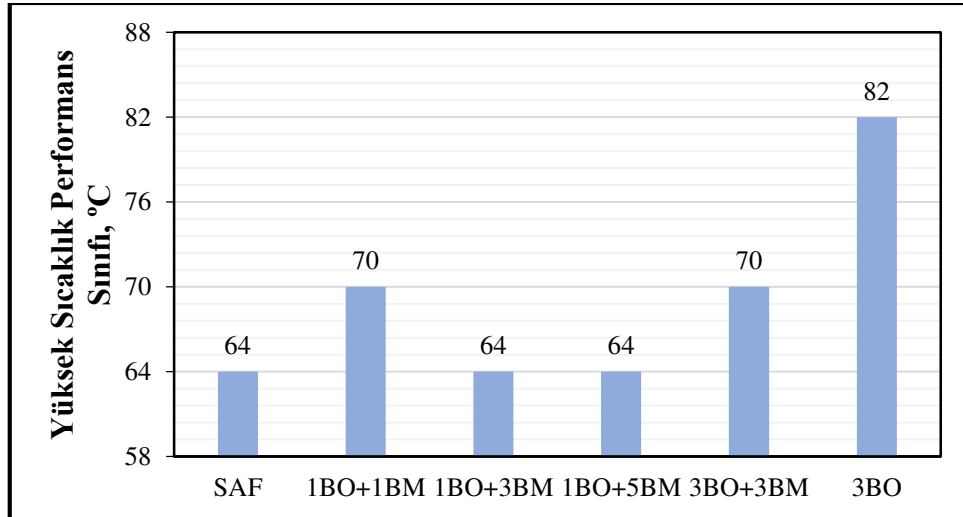
Numune Kodu	Yüksek Sıcaklık Performans Sınıfı
SAF	PG 64-XX
1BM	PG64-XX
3BM	PG64-XX
5BM	PG58-XX
7BM	PG58-XX
9BM	PG58-XX

Tablo 15. Bor oksit içeren bitümlere ait yüksek sıcaklık performans sınıfları

Numune Kodu	Yüksek Sıcaklık Performans Sınıfı
SAF	64-XX
1BO+1BM	70-XX
1BO+3BM	64-XX
1BO+5BM	64-XX
3BO+3BM	70-XX
3BO	82-XX



Şekil 86. Balmumu modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları



Şekil 87. Bor oksit içeren bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları

Şekil 86 incelendiğinde saf bitüm, 1BM ve 3BM modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfının 64 °C; 5BM, 7BM ve 9BM modifiye bitümlerin 58°C olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan hareketle, saf bitüme %5 ve üzerindeki oranlarda balmumu eklenmesinin tekerlek izi performansı üzerinde olumsuz etki göstereceği düşünülmektedir. Şekil 87 incelendiğinde ise 1BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfının 64°C, 1BO+1BM ve 3BO+3BM modifiye bitümlerin 70°C ve 3BO modifiye bitümün 82 °C olduğu görülmektedir. 1BO+1BM, 3BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları sırası ile 1BM, 3BM ve 5BM modifiye bitümlere göre bir kademe daha yüksektir. Bu durum bor oksitin tekerlek izi performansı üzerinde ileri düzeyde iyileştirici etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bütün numuneler arasında tekerlek izi performansı bakımından en iyi sonucu 3BO modifiye bitüm vermiştir. Saf bitüme %3 oranında bor oksit eklenmesi ile saf bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfı 64 °C'den 82 °C'ye çıkmıştır. Bu sonuçlar, bor oksitin tekerlek izi performansı üzerinde çok belirgin bir etkisinin olduğunu, saf bitüme tek başına veya aynı oranda balmumu ile eklenmesinin saf bitümün tekerlek izi performansını geliştireceğini göstermektedir.

3.11.2. Kısa Dönemli Yaşlanma Sonrası DSR Sonuçları

RTFOT yöntemi ile yaşlandırılan bağlayıcılara ait DSR sonuçları Tablo 16 ve 17'te verilmiştir. Yaşlandırılmayan bağlayıcılarda olduğu gibi RTFOT ile kısa dönemli yaşlandırılan numuneler için de DSR deneyine 64 °C sıcaklıkta başlanmıştır. Deney uygulanan sıcaklıkta numunenin tekerlek izi parametresi Superpave şartnamesinin alt sınırı olan 2200 Pa değerini sağladığında bir üst sıcaklığa geçilmiş, sağlamadığında ise bir alt sıcaklık değerinde deney uygulanmıştır. Numunenin tekerlek izi parametresi deney uygulanan sıcaklıkta şartname kriterini sınır değere yakın bir değerde sağlamış ise bir üst sıcaklığa bakmaya gerek duyulmamıştır.

Tablo 16. RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

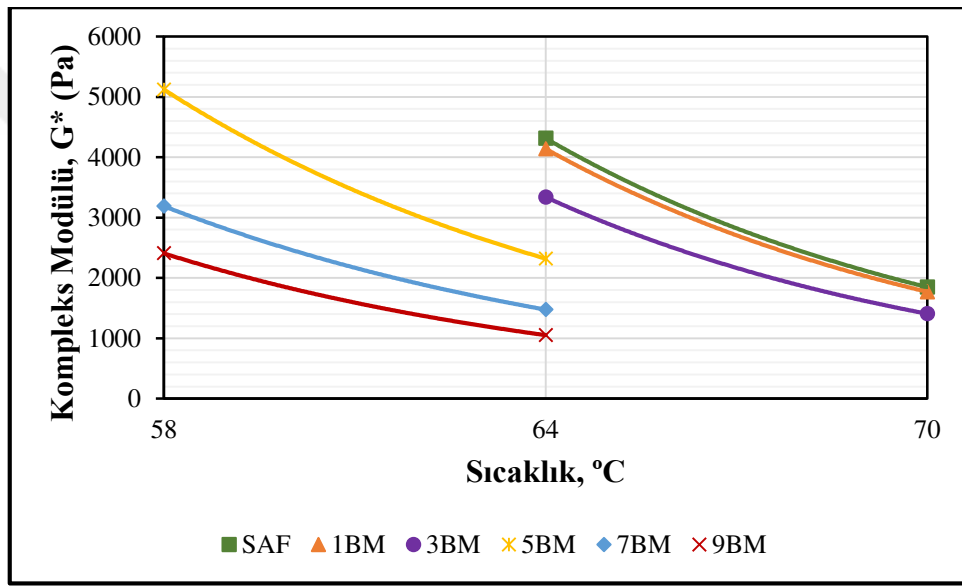
Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (ASTMD6373)
SAF	64	4314,2	82,06	4356	2200 Minimum
	70	1847,7	84,27	1857	
1BM	64	4140,3	82,51	4176	
	70	1770,5	84,73	1778	
3BM	64	3340,3	82,78	3367	
	70	1406,4	84,97	1411	
5BM	58	5121,7	80,63	5191	
	64	2321,2	83,54	2336	
7BM	58	3189,0	81,67	3223	
	64	1475,4	84,21	1483	
9BM	58	2407,6	82,39	2429	
	64	1052,3	84,58	1057	

Tablo 17. RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

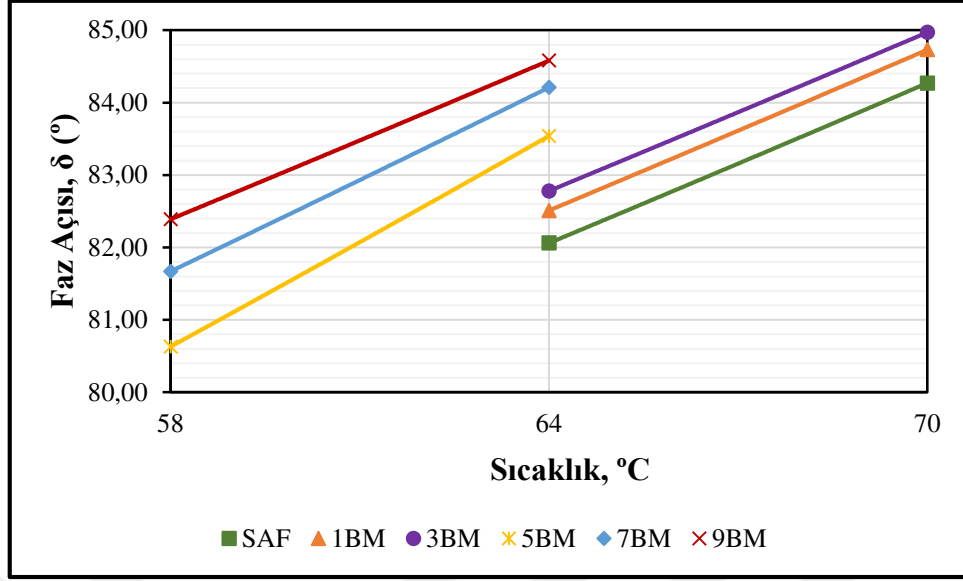
Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (ASTMD6373)
SAF	64	4314,2	82,06	4356	2200 Minimum
	70	1847,7	84,27	1857	
1BO+1BM	64	5059,8	77,14	5190	
	70	2463,2	79,64	2504	
1BO+3BM	64	3761,3	78,75	3835	
	70	1631,3	81,36	1650	
1BO+5BM	64	2955,5	79,80	3003	
	70	1152,1	82,89	1161	
3BO+3BM	64	5568,6	73,76	5800	
	70	2541,2	76,45	2614	
3BO	64	9923,0	70,76	10510	
	70	5065,9	72,22	5320	
	76	2657,2	74,09	2763	

Saf ve balmumu modifiyeli bitümlere ait G* ve δ değerleri sırası ile Şekil 88 ve 89'da grafik halinde verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde RTFOT öncesinde olduğu gibi sonrasında da saf bitüme kıyasla balmumu modifiyeli bitümler daha düşük G* ve daha yüksek δ değerlerine sahiptir. Bor oksit içeren bitümlere ait G* ve δ değerleri ise sırası ile Şekil 90 ve 91'de verilmiştir. Yine yaşlandırılmamış bağlayıcılarda olduğu gibi kısa dönemli

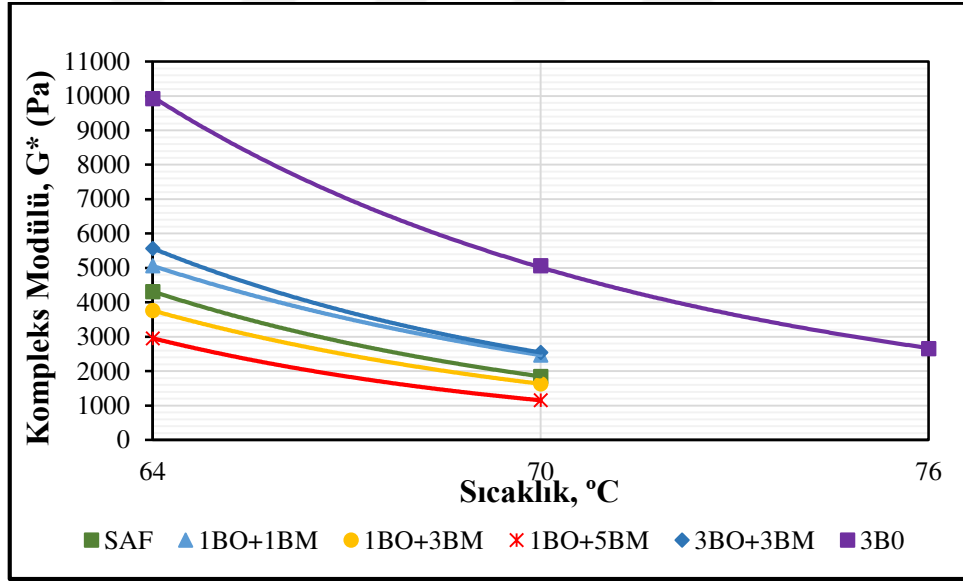
yaşlandırılan bağlayıcılarda da 1BO+1BM, 3BO+3BM ve 3BO boroksit modifiye bitümler saf bitüme kıyasla daha yüksek G^* değerine sahiptir. 1BO+3BM ve 1BO+5BM modifiye bitümler sırası ile 3BM ve 5BM modifiye bitümlere kıyasla daha yüksek, saf bitüme kıyasla daha düşük G^* değerlerine sahiptir. Faz açısı değerleri bakımından ise bor oksit içeren bütün bitümler saf bitüme ve bor oksit içermeyen aynı oranda balmumu modifiyeli bitümlere kıyasla daha düşük δ değerlerine sahiptir. Bütün bu sonuçlar, kısa dönemli yaşlanma sonrasında da bor oksitin sertleştirici ve elastiyet artırıcı özelliğini koruduğunu göstermektedir.



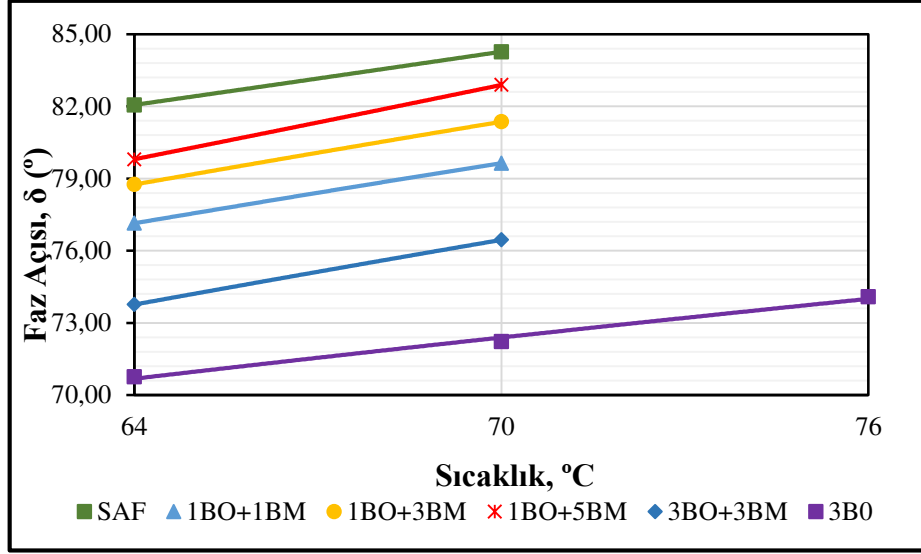
Şekil 88. RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait kompleks kayma modülleri



Şekil 89. RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait faz açıları

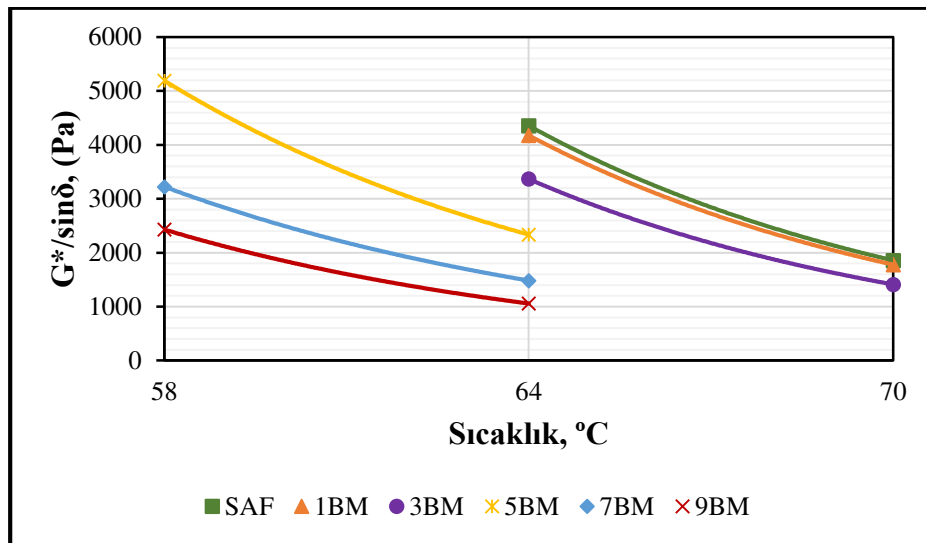


Şekil 90. RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait kompleks modülleri

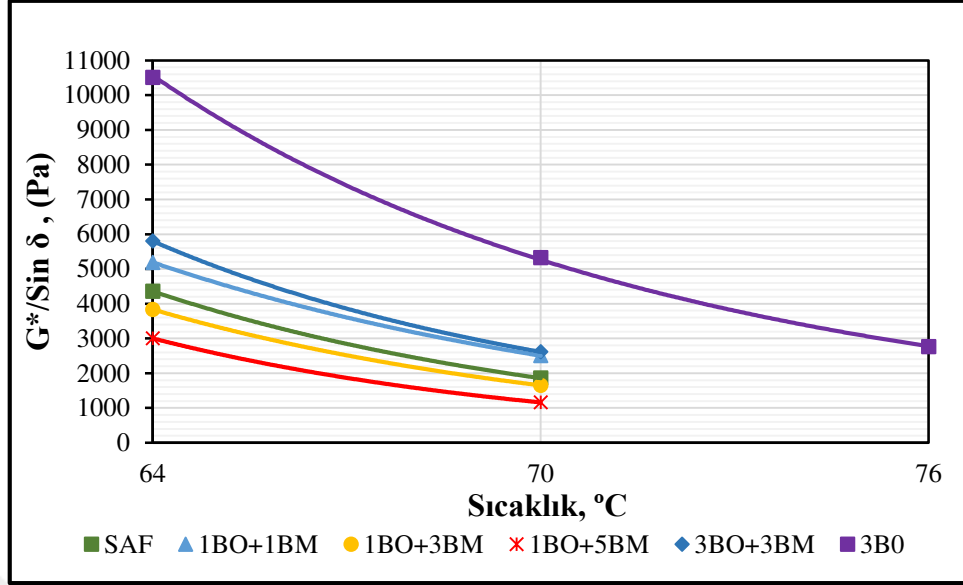


Şekil 91. RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait faz açıları

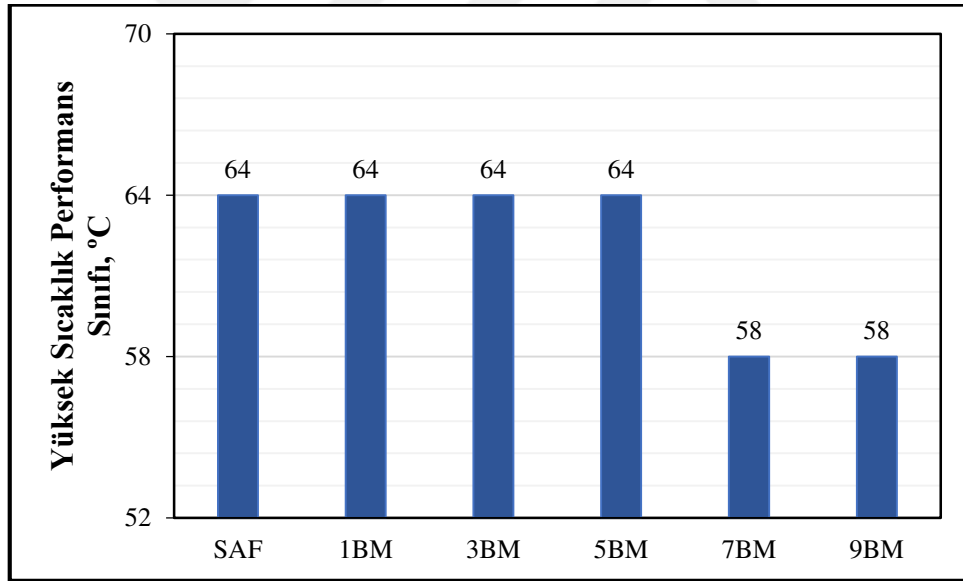
Saf ve modifiye bitümlere ait $G^*/\sin\delta$ değerleri Şekil 92 ve 93'te grafik halinde verilmiştir. Bu değerler dikkate alınarak bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıflandırması yapılmış ve yüksek sıcaklık performans sınıfları Şekil 94 ve 95'te grafik halinde verilmiştir. 5BM modifiye bitüm yaşlandırma öncesine göre bir üst performans seviyesine çıkarken, 3BO modifiye bitüm bir alt performans seviyesine düşmüştür. Diğer bütün numuneler ise yaşlanma öncesindeki performans seviyelerini yaşlanma sonrasında korumuşlardır.



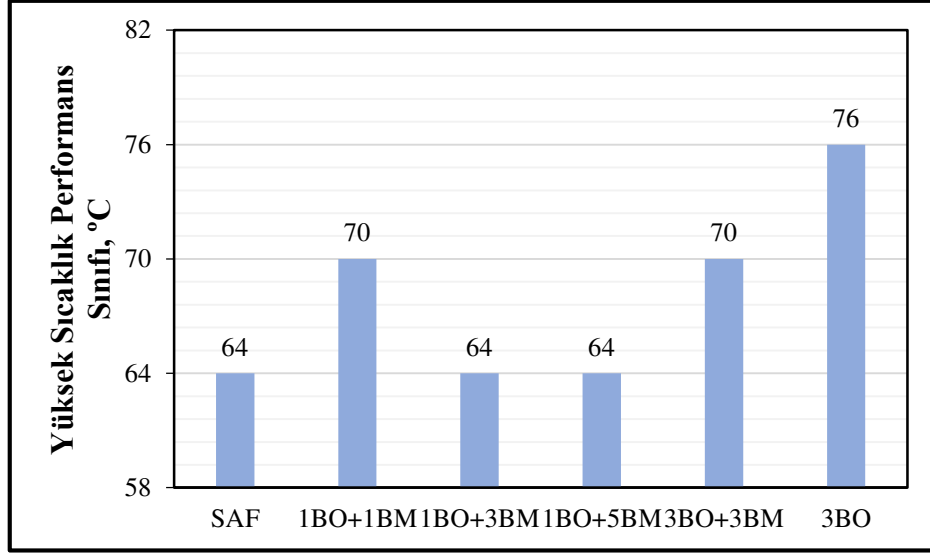
Şekil 92. RTFOT ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait tekerlek izi parametreleri



Şekil 93. RTFOT ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait tekerlek izi parametreleri



Şekil 94. Balmumu modifiyeli bitümlerin RTFOT sonrası yüksek sıcaklık performans sınıfları



Şekil 95. Bor oksit içeren bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıfları

3.11.3. PAV Sonrası DSR Sonuçları

PAV yöntemi ile yaşlandırılan numunelere orta sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanmıştır. Deney sıcaklıkları numunelerin yüksek sıcaklık performans sınıfları dikkate alınarak Superpave şartnamesinden seçilmiştir. Şartname gereği numunelerin orta sıcaklıklardaki G^* . Sin δ değerlerinin 5000 kPa değerini aşmaması gerekmektedir. Saf ve modifiye bitümlere ait G^* . Sin δ değerleri Tablo 18 ve 19’de verilmiştir.

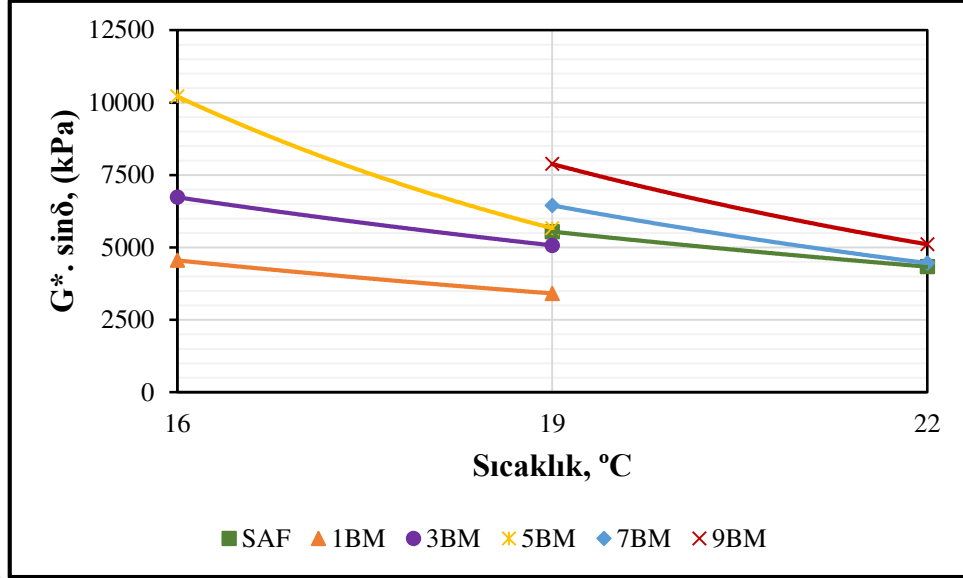
Tablo 18. PAV ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G^* . Sin δ (Pa)	Şartname Limiti (kPa) (ASTMD6373)
SAF	19	5546	5000 Maksimum
	22	4337	
1BM	16	4554	
	19	3413	
3BM	16	6732	
	19	5072	
5BM	16	10215	
	19	5665	
7BM	19	6453	
	22	4459	
9BM	19	7880	
	22	5108	

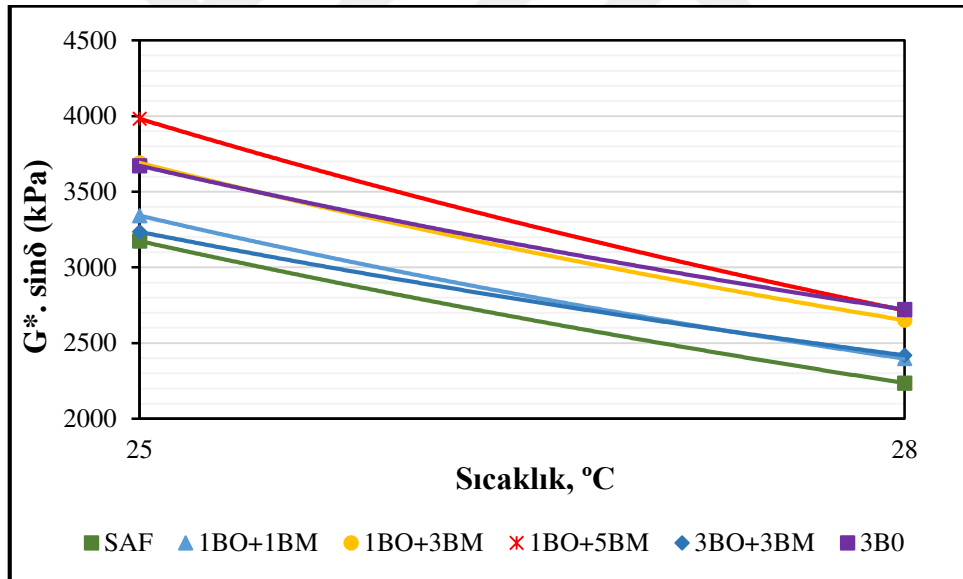
Tablo 19. PAV ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait DSR deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	G*. Sinδ (Pa)	Şartname Limiti (kPa) (ASTMD6373)
SAF	25	3174	5000 Maksimum
	28	2236	
1BO+1BM	25	3342	
	28	2397	
1BO+3BM	25	3691	
	28	2651	
1BO+5BM	25	3982	
	28	2716	
3BO+3BM	25	3235	
	28	2419	
3BO	25	3672	
	28	2721	

Şekil 96 ve 97’de ise saf ve modifiye bitümlere ait G*. Sinδ değerleri grafik olarak verilmiştir. Şekil 96 incelendiğinde, 19 °C’de saf ve 1BM modifiye bitümlerin şartname kriterini sağladığı ve diğer balmumu modifiyeli bitümlerin bu sıcaklık değerinde şartname kriterini sağlamadığı görülmektedir. 1BM modifiye bitüm saf bitüme kıyasla daha düşük diğer balmumu modifiye bitümler ise daha yüksek G*. Sinδ değerlerine sahiptir. Bu sonuç saf bitüme %1 oranında balmumu eklenmesinin saf bitümün yorulma dayanımı üzerinde iyileştirici bir etkisinin olduğunu ve daha yüksek oranlarda balmumu eklenmesinin saf bitümün yorulma dayanımını azaltacağını göstermektedir. Şekil 97 incelendiğinde ise saf ve bor oksit içeren bütün bitümlerin 25 °C ve 28 °C sıcaklıklarda şartname kriterini sağladığı görülmektedir. Ancak bor oksit içeren bütün bitümler saf bitüme kıyasla daha yüksek G*. Sinδ değerlerine sahiptir. Bu sonuç, bor oksitin yorulma dayanımı üzerinde az da olsa negatif bir etkisinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 96. PAV ile yaşlandırılmış balmumu modifiyeli bitümlere ait G^* . $\sin\delta$ değerleri



Şekil 97. PAV ile yaşlandırılmış bor oksit içeren bitümlere ait G^* . $\sin\delta$ değerleri

3.12. BBR Deneyi Sonuçları

Saf ve balmumu modifiyeli bitümlere uygulanan BBR deneyine ait sonuçlar Tablo 20’de verilmiştir. Sünme rijitliği ve sünme oranı değerleri ayrı ayrı grafikler halinde Şekil 98 ve 99’da gösterilmiştir. Şekil 98 ve 99 incelendiğinde, saf bitüme %1, %3, %5, %7 ve %9 oranında balmumu ilavesi ile saf bitümün -6 °C sıcaklıktaki sünme rijitliğinin sırası ile

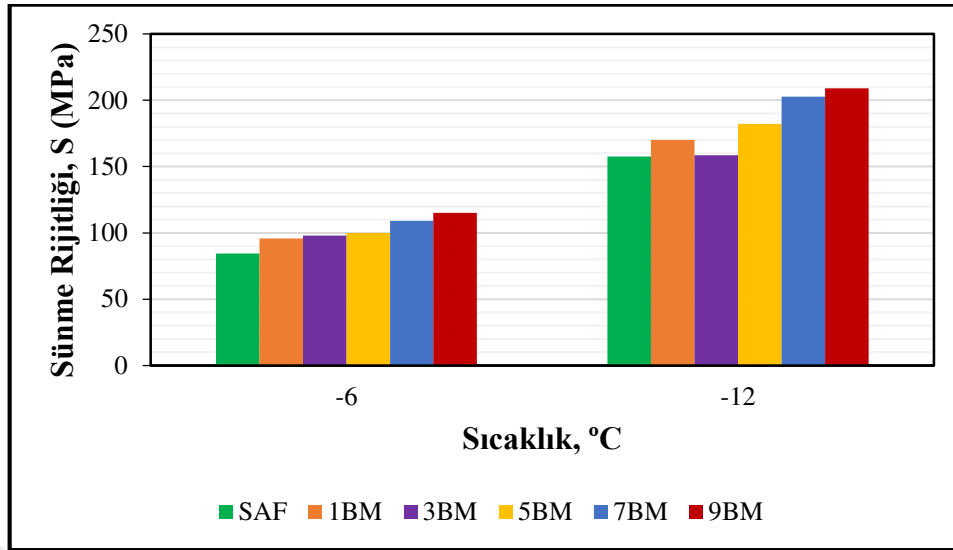
%13.6, %16.2, %18.4, %29.2 ve %36.6 arttığı görülmektedir. -12 derecede yapılan deney sonuçlarında ise %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında balmumu ilavesi ile saf bitümün sünme rijitliğinde sırası ile %7.9, %0.5, %15.7, %28,6 ve %32.6 oranlarında artış görülmüştür. Sünme rijitliklerindeki bu artış balmununun düşük sıcaklıklarda saf bitümün rijitliğini arttırdığını göstermektedir. Saf bitüme kıyasla aynı deney sıcaklıklarında modifiye bitümlerin sünme oranlarında düzenli bir artış ya da azalış görülmemektedir. Şartname gereği uygulanan deney sıcaklığında bitümlerin sünme rijitliğinin 300 MPa'dan küçük ve sünme oranının 0,300'den büyük olması gerekmektedir. Deney uygulama sıcaklığında bu şartı sağlayan bitümlerin uygulamada deney sıcaklığından 10 °C daha düşük sıcaklıkta düşük ısı çatlaklarına karşı direncinin yeterli olduğu kabul edilir.

Tablo 20'de görüldüğü üzere -12 °C deney sıcaklığında 1BM modifiye bitüm dışında hiçbir bitüm numunesi sünme rijitliği ve sünme oranı kriterini aynı anda sağlamamıştır. Ancak saf ve balmumu modifiyeli bütün numuneler -6°C deney sıcaklığında her iki kriteri de sağlamaktadır.

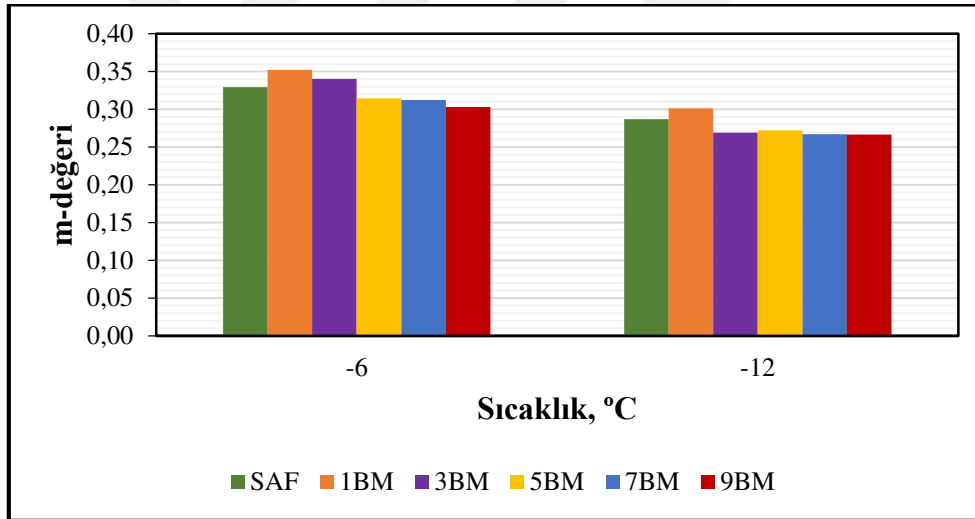
Bu sonuç, saf ve bütün balmumu modifiyeli bitümlerin uygulamada -16 °C sıcaklıkta düşük ısı çatlaklarına karşı performanslarının yeterli olacağını göstermektedir. BBR sonuçları, balmumu ilavesi ile saf bitümün düşük sıcaklıktaki rijitliğinin arttığını; ancak bu etkinin saf bitümün düşük sıcaklık performans sınıfını düşürücek kadar belirgin olmadığını göstermektedir. Bir diğer ifade ile balmumunun saf bitümün düşük sıcaklık performansını olumsuz etkilemediği düşünülmektedir.

Tablo 20. Balmumu modifiyeli bitümlere ait BBR deneyi sonuçları

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği, S (MPa) $\leq$ 300 olmalı	Sünme Oranı, $m \geq 0,300$ olmalı
SAF	-6	84,33	0,3291
	-12	157,63	0,2871
1BM	-6	95,82	0,352
	-12	170,05	0,3015
3BM	-6	98,03	0,3401
	-12	158,49	0,2691
5BM	-6	99,86	0,3146
	-12	182,34	0,2722
7BM	-6	108,94	0,3123
	-12	202,72	0,2668
9BM	-6	115,210	0,3031
	-12	209,04	0,2664



Şekil 98. Balmumu modifiyeli bitümlere ait sünme rijitliği değerleri



Şekil 99. Balmumu modifiyeli bitümlere ait m-değerleri (sünme oranları)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 50/70 penetrasyonlu bitüme balmumu ve bor oksit katkıları farklı oranlarda ayrı ayrı ve birlikte eklenerek saf bitüm modifiye edilmiştir. Yapılan modifikasyonların saf bitümün yapısal, fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için hazırlanan numunelere FT-IR analizi, geleneksel ve Superpave bitüm deneyleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri sonucunda, balmumu ve bor oksit katkılarının saf bitüme ayrı ayrı veya birlikte eklenmesinin saf bitümün penetrasyon değerini azaltıp, yumuşama noktası değerini arttırdığı görülmektedir. Saf bitüme aynı oranda balmumu ve bor oksit ayrı ayrı eklendiğinde ise, bor oksit modifiyeli bitümün balmumu modifiyeli bitüme kıyasla daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktası değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, saf bitüm üzerinde bor oksitin sertleştirici ve ısı duyarlılığını iyileştirici etkisinin balmumundan daha belirgin olduğunu göstermektedir.
- Düktilite deneyleri sonucunda, genel olarak balmumu ve bor oksitin saf bitümün uzayabilme yeteneğini azalttığı görülmektedir. Deney sırasında 3BM modifiye bitümde herhangi bir kopma gözlenmemişken, 3BO modifiye bitümde kopma meydana gelmiştir. Bu durum, bor oksitin saf bitümün uzayabilme yeteneği üzerindeki olumsuz etkisinin balmumundan daha belirgin olduğunu göstermektedir.
- Trikloretilende çözünürlük deneyleri sonucunda, saf ve bütün modifiye bitümlerin trikloretileten içerisinde %99.9 oranında çözündüğü görülmüştür.
- Nicholson soyulma deneyleri sonucunda, saf bitüme balmumu eklenmesi ile saf bitümün soyulma direncinde çok belirgin bir iyileşme görülmüştür. Saf bitüme bor oksit eklendiğinde ise soyulma direncinde çok az bir artış görülmüştür. Balmumu ve bor oksit birlikte eklendiğinde ise şaşırtıcı derecedede iyi sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, 1BO+5BM modifiye bitümde herhangi bir soyulma görülmemiştir. Bu sonuçlar, balmumunun saf bitüme tutunmasının güçlü olduğunu, buna karşılık bor oksitin tutunmasının zayıf olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte saf bitüme balmumu ve bor oksit birlikte eklendiğinde bor oksitin balmumu içeriğinde bulunan bazı ester bileşenlerine tutunarak balmumu ile birlikte saf bitümün soyulma direncini etkili bir şekilde iyileştirdiği düşünülmektedir.

- RV deneyleri sonucunda, saf bitümün işlenebilirliğini balmumunun etkili bir şekilde arttırdığı, bor oksitin ise azalttığı görülmektedir. Bütün deney numuneleri şartname kriterini sağlamıştır. Her iki katkı birlikte kullanıldığında 1BO+1BM ve 3BO+3BM modifiye bitümler saf bitümle hemen hemen aynı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına sahiptir. Diğer balmumu ve bor oksit kombinasyonlarında ise balmumunun etkisi daha belirgin olup, saf bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları azalmıştır.
- RTFOT sonucunda, her iki katkının da saf bitümün kütle kaybını azalttığı ve bütün numunelerin şartname kriterini sağladığı görülmüştür. 3BO modifiye bitümde 3BM modifiye bitüme kıyasla daha az kütle kaybı görülmüştür. Bu sonuçlar, her iki katkının da saf bitümün yaşlanmaya karşı direncini arttırdığını ve bor oksitin etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir.
- DSR deneyleri defalarca tekrarlanmasına rağmen, saf bitüme balmumu eklenmesi ile şaşırtıcı bir şekilde saf bitümün kompleks kayma modülü ve tekerlek izi parametresinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları ile çelişmektedir. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde balmumunun saf bitümde belirgin bir fiziksel sertleşmeye yol açtığı ve saf bitümün ısı duyarlılığını azalttığı görülmüştür. Ancak bu durum DSR deneyi sonuçlarına yansımamıştır. Bu sonucun balmumunun içerdiği kimyasal bileşenler ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Zira bitümdeki sertleşmenin balmumundaki aşırı yumuşamaya yol açan bazı bileşenlerin uzaklaştırılmış olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bununla birlikte, DSR deneyinden elde edilen sonuçlara göre, balmumundan elde edilen monoester ağırlıklı katkının polar gruplar ve kısa zincirli fraksiyonlarının yüksek olması sonucu bitüme eklendiğinde bitümde fiziksel bir sertleşmeye sebep olduğu ancak katkının bitümün uzun hidrokarbon zincirleri ile örtüşmesinin zayıf olması sonucu tekerlek izi performansı üzerinde olumsuz etki gösterdiği düşünülmektedir.
- DSR deneyleri sonucunda, bor oksitin saf bitüme eklenmesi ile saf bitümün tekerlek izi direncinde çok belirgin bir iyileşmenin olduğu görülmektedir. Saf

bitüme %3 oranında bor oksit eklenmesi saf bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfını üç kademe (64 °C'den 82 °C'ye) yükseltmiştir ki; bu gerçekten çok tatmin edici bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Bor oksit ve balmumu birlikte kullanıldığında ise 1BO+1BM ve 3BO+3BM modifiye bitümler saf bitümden bir kademe yüksek, 1BO+3BM ve 1BO+5BM bitümler saf bitümle aynı yüksek sıcaklık performans sınıfını sağlamıştır.

- RTFOT sonrası DSR deneyleri sonucunda, RTFOT öncesi sonuçlarla benzer olarak saf bitümün tekerlek izi direncini balmumunun azalttığı ve bor oksitin arttırdığı görülmektedir. RTFOT öncesine kıyasla 5BM modifiye bitüm bir performans sınıfı kazanmış, 3BO modifiye bitüm bir performans sınıfı kaybetmiş ve diğer numuneler ise performans seviyelerini korumuşlardır. Ancak yine de 3BO modifiyeli bitümün tekerlek izi performansı saf bitüme göre çok iyi düzeydedir.
- PAV sonrası DSR deneyleri sonucunda, saf bitüme %1 oranında balmumu ilavesi ile saf bitümün yorulma dayanımında bir artış görülmüştür. Daha yüksek oranlarda balmumu eklenmesi ise saf bitümün yorulma dayanımını azaltmıştır. Saf bitüme bor oksit veya bor oksit ve balmumu birlikte eklendiğinde ise saf bitümün yorulma direnci azalmış, ancak deney uygulanan sıcaklıklarda bor oksit içeren bütün bitümler şartname sınırını sağlamıştır.
- BBR deneyleri sonucunda, saf bitüme balmumu eklenmesi ile saf bitümün süne rijitliğinin arttığı görülmektedir. Sadece BBR sonuçları referans alınarak düşük sıcaklık performans sınıflandırması yapıldığında saf bitüme %1 oranında balmumu eklenmesinin saf bitümün düşük sıcaklık performansını bir kademe geliştirdiği, daha yüksek oranlarda eklenmesinin ise saf bitümün performans sınıfını değiştirmediği görülmüştür. Bu sonuçtan hareketle, balmumunun saf bitümün düşük sıcaklık performansını olumsuz etkilemediği düşünülmektedir.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; balmumunun saf bitümün işlenebilirliğini arttırdığı, bor oksitin ise saf bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfını üç kademe arttırdığı görülmüştür. Aynı oranlarda balmumu ve bor oksit birlikte kullanıldığında ise saf bitümün işlenebilirliğinde neredeyse hiç azalma olmadan yüksek sıcaklık performans sınıfında artış görülmüştür. Dolayısı ile iki katkı eşit oranlarda birlikte kullanıldığında saf bitümün işlenebilirlik performansı kötüleştirilmeden tekerlek izi performansının arttırılabileceği düşünülmektedir. Saf bitüme balmumu veya balmumu ve bor oksit birlikte eklendiğinde, saf bitümün soyulma direncinde gözle görülür bir artış

meydana gelmiştir. Bu sonuçtan hareketle, özellikle su etkisine fazla maruz kalan asfalt kaplamalarda balmumu veya balmumu+bor oksit modifiyeli bitüm kullanmanın kaplamanın servis ömrünü arttıracakı düşünülmektedir.

Saf bitüme balmumu ve bor oksit katkılarının farklı oranlarda ayrı ayrı ve çeşitli kombinasyonlarla birlikte eklendiği bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar dikkate alınarak aşağıdaki öneriler yapılabilir.

- Balmumu ve bor oksit katkılarını birlikte kullanmanın saf bitümün soyulma performansı üzerindeki etkileri farklı yöntemlerle detaylı incelenmelidir.
- Bu çalışma sonucunda, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi performansının geliştirilmesinin amaçlandığı benzer çalışmalarda katkı maddeleri seçilirken katkının kimyasal yapısında iki temel özelliğin aranması gerektiği düşünülmektedir. Bu özellikler katkının kimyasal yapısında polar grupların az ve orta-uzun karbon zincirli bileşenlerin fazla olması gerektiğine işaret etmektedir.
- Balmumunun bitüm modifikasyonunda polimerik malzemeler veya uzun hidrokarbon zincirli waxlarla birlikte kullanımı araştırılmalıdır.
- Saf bitüme %1'den daha az oranlarda balmumu eklenmesinin bitümün yorulma dayanımı ve düşük sıcaklık performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Bu çalışmada, ağırlıklı olarak balmumu kombinasyonları üzerinde çalışılmış olup bor oksitin bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri daha farklı oranlarda kullanılarak daha detaylı ve bitümlü sıcak karışım deneylerini de kapsayan daha geniş kapsamlı araştırma yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Oruç, Ş., Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997
2. Geçkil, T., Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
3. Kök, B. V., Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
4. Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacsson, U., Rheological Effects of Commercial Waxes and Polyphosphoric Acid in Bitumen 160/220- Low Temperature Performance, Fuel, 85 (2006) 989-997.
5. Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacsson, U., Effects of Commercial Waxes on Asphalt Concrete Mixtures Performance at Low and Medium Temperatures, Cold Regions Science and Technology, 45 (2006) 31-41.
6. Tasdemir, Y., High Temperature Properties of Wax Modified Binders and Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 23 (2009) 3220-3224.
7. Merusi, F., Caruso, A., Roncella, R. ve Giuliani, F., Moisture Susceptibility and Stripping Resistance of Asphalt Mixtures Modified with Different Synthetic Waxes, Transportation Research Record, 2180,1 (2010) 110-120.
8. Liu, J., Saboundjian, S., Li, P., Connor, B. ve Brunette, B., Laboratory Evaluation of Sasobit-Modified Warm-Mix Asphalt for Alaskan Conditions, Journal of Materials in Civil Engineering, 23,11 (2011) 1498-1505.
9. Shang, L., Wang, S., Zhang, Y. ve Zhang, Y., Pyrolyzed Wax from Recycled Cross-Linked Polyethylene as Warm Mix Asphalt (WMA) Additive for SBS Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 25,2 (2011) 886-891.
10. Zhao, G. J. ve Guo, P., Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt, Energy Procedia, 16 (2012) 1230-1236.
11. Banerjee, A., de Fortier Smit, A. ve Prozzi, J. A., The Effect of Long-Term Aging on the Rheology of Warm Mix Asphalt Binders, Fuel, 97 (2012) 603-611.
12. Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. N. ve Putman, B. J., Characterization of Rutting Performance of Warm Additive Modified Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 31 (2012) 265-272.

13. Yang, S., Lee, J., Hwang, S., Kwon, S. ve Baek, C., Development of Warm-Mix Asphalt Additive and Evaluation of Performance, Transportation Research Record, 2294,1 (2012) 89-97.
14. Das, P. K., Tasdemir, Y. ve Birgisson, B., Evaluation of Fracture and Moisture Damage Performance of Wax Modified Asphalt Mixtures, Road Materials and Pavement Design, 13,1 (2012) 142-155.
15. Yi-qiu, T., Lei, Z., Wei-qiang, G. ve Meng, G., Investigation of the Effects of Wax Additive on the Properties of Asphalt Binder, Construction and Building Materials, 36 (2012) 578-584.
16. Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J. ve Pérez, I., Study of the Effect of Four Warm Mix Asphalt Additives on Bitumen Modified with 15% Crumb Rubber, Construction and Building Materials, 43 (2013) 300-308.
17. Kök, B. V., Yılmaz, M. ve Akpolat, M., Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS+ Sasobit Modified Binder, Construction and Building Materials, 63 (2014) 174-179.
18. Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L. T. ve Solouki, A., A Laboratory Investigation on the Rheological Properties of Aged and Unaged Organic Wax Modified Asphalt Binders, Petroleum Science and Technology, 33,7 (2015) 757-764.
19. Kim, H. H., Jeong, K.D., Lee, M.S. ve Lee, S. J., Effect of FT Paraffin Wax Contents on Performance Properties of Crumb Rubber- Modified Asphalt Binders, Journal of Materials in Civil Engineering, 27, 11 (2015): 04015011.
20. Ghuzlan, K. A. ve Ar'ar, O. S., Performance of Warm Asphalt Mixtures Using Sasobit, Petroleum Science and Technology, 34, 14 (2016) 1263-1271.
21. Feitosa, J. P., de Alencar, A. E., Nelson Filho, W., de Souza, J. R., Branco, V. T. C., Soares, J. B. ve Ricardo, N. M., Evaluation of Sun-Oxidized Carnauba Wax as Warm Mix Asphalt Additive, Construction and Building Materials, 115 (2016) 294-298.
22. Nakhaei, M., Darbandi Olia, A. D., Akbari Nasrekani, A. ve Asadi, P., Rutting and Moisture Resistance Evaluation of Polyethylene Wax-Modified Asphalt Mixtures, Petroleum Science and Technology, 34,17-18 (2016) 1568-1573.
23. Mazumder, M., Kim, H. ve Lee, S. J., Performance Properties of Polymer Modified Asphalt Binders Containing Wax Additives, International Journal of Pavement Research and Technology, 9,2 (2016) 128-139.
24. Ghuzlan, K. A. ve Al Assi, M. O., Sasobit-Modified Asphalt Binder Rheology, Journal of Materials in Civil Engineering, 29,9 (2017): 04017142.

25. Zhao, X., Yan, K., He, W. ve Cai, C., Effects of Sasobit/Deurex on Amorphous Poly Alpha Olefin (APAO) Modified Asphalt Binder, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 323-330.
26. Nakhaei, M., Naderi, K., Nasrekani, A. A. ve Timm, D. H., Moisture Resistance Study on PE-Wax and EBS-Wax Modified Warm Mix Asphalt Using Chemical and Mechanical Procedures, *Construction and Building Materials*, 189 (2018) 882-889.
27. Ali, A. W., Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Characterization of Polymer Modified Asphalt Binder Containing Wax Additives, 2018.
28. Yang, S., Yan, K., He, W. ve Wang, H., Laboratory Evaluation of Deurex-Modified Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30,1 (2018): 04017258.
29. Gao, J., Yan, K., He, W., Yang, S. ve You, L., High Temperature Performance of Asphalt Modified with Sasobit and Deurex, *Construction and Building Materials*, 164 (2018) 783-791.
30. Yang, P. ve Liu, J., Rheological Properties of Deurex-Modified WMA Binder Containing SBS, *Petroleum Science and Technology*, 36,12 (2018) 813-819.
31. Kataware, A. V. ve Singh, D., Effects of Wax-Based, Chemical-Based, and Water-Based Warm-Mix Additives on Mechanical Performance of Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30,10 (2018): 04018237.
32. Yang, S., Yan, K., He, W. ve Wang, Z., Effects of Sasobit and Deurex Additives on Asphalt Binders at Midrange and High Temperatures, *International Journal of Pavement Engineering*, 20,12 (2019) 1400-1407.
33. Ameri, M., Afshin, A., Shiraz, M. E. ve Yazdipanah, F., Effect of Wax-Based Warm Mix Additives on Fatigue and Rutting Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt, *Construction and Building Materials*, 262 (2020): 120882.
34. Sani, A., Mohd Hasan, M. R., Shariff, K. A., Jamshidi, A., Poovaneshvaran, S. ve Shahid, K. A., Physico-Mechanical and Morphological Properties of Wax Latex-Modified Asphalt Binder, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45 (2021) 865-878.
35. Arslan, D., Gürü, M. ve Çubuk, M. K., Performance Assesment of Organic- Based Synthetic Calcium and Boric Acid Modified Bitumens, *Fuel*, 102 (2012) 766-772.
36. 36. Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Bostancıoğlu, M., Borik Asitin Asfaltın Fiziksel Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 297-306.
37. Arslan, D., Gürü, M. ve Çubuk, M. K., Preventing of Rutting and Crackings in the Bituminous Mixtures by Monoethylene and Diethylene Glycol Based Synthetic Polyboron Compounds, *Construction and Building Materials*, 50 (2014) 102-107.

38. Selman, G. Ş., Bor Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015.
39. Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Sancak, K., Effect of Boron-containing Additives on Rheological Properties of Asphalt Binder, Road Materials and Pavement Design, 17, 4 (2016) 810-824.
40. Oruç, Ş. ve Yılmaz, B., Improvement in Performance Properties of Asphalt Using a Novel Boron-containing Additive, Construction and Building Materials, 123 (2016) 207-213.
41. Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D. ve Aminbakhsh, S., Effects of Sugar Beet Molasses and Molasses- Based Boron Oxide Compound on Bitumen Properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 4 (2017), Article Number: 04016252.
42. Keskin, M. ve Karacasu, M., Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30,2 (2018) 185-192.
43. Şahin, D., Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
44. Orhan, F., Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2012.
45. <https://gercekistan.blogspot.com>. Ham Petrol Ayrıştırılması. 13 Kasım 2021.
46. Whiteoak, D., Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A. H. ve Lav, A., İsfalt Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 2004.
47. Sybilski, D., Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens And Rutting Resistance of Pavement, Material and Structures, 27 (1994) 110-120.
48. Avcı, E., Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.
49. Yayla, N., Karayolu Mühendisliği, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2018.
50. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
51. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 2001.

52. Kizirgil, M. E., Stiren-Butadien-Stiren ve Uçucu Külün Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2013.
53. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2007.
54. Bostancıoğlu, M., Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
55. Yılmaz, B., Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
56. www.bisantiye.com/asfalt-betonu-kaplamalarda-meydana-gelen-bozulmalar-nedenleri-ve-iyilestirilmeleri/. 23 Eylül 2021.
57. Kutluhan, S. ve Ağar, E., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Faktörler ve Azaltmaya Yönelik Öneriler, İ.T.Ü Dergisi, 8,6(2009) 179-191.
58. Umar, F. ve Ağar, E., Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Matbaası, İstanbul, 1991.
59. Tunç, A., Esnek Kaplama Malzemeleri El kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
60. Karakaş, A. S., Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014.
61. www.pavemanpro.com/article/identifying_asphalt_pavement_defects/. 23 Eylül 2021.
62. ASTM D5, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, Philadelphia, 2020.
63. ASTM D36-14, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International, Philadelphia, 2020.
64. ASTM D92, Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, ASTM International, Philadelphia, 2018.
65. ASTM D113, Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials. ASTM International, Philadelphia, 2017.
66. ASTM D70, Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method), ASTM International, Philadelphia, 2021.

67. ASTM D2872, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, Philadelphia, 2019.
68. ASTM D6521, Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), ASTM International, Philadelphia, 2019.
69. Zaniwski, J. P. ve Pumphrey, M. E., Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 2004.
70. ASTM D7175, Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, Philadelphia, 2015.
71. ASTM D6648, Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), ASTM International, Philadelphia, 2016.
72. McGennis, R. B., Shuler, S. ve Bahia, H. U., Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No, FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p, 1994.
73. Birliker, R. Y., Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
74. <https://tr.wikipedia.org>. Balmumu, Üretimi. 15 Kasım 2021.
75. Topal, E., Ceylan, Ö., Köseoğlu, M., Margaoan, R. ve Cornea-Cıpcıgan, M., Bal Mumunun Yapısı, Kullanım Alanları ve Bazı Temel Sorunları, Uludağ Arıcılık Dergisi, 20,2 (2020) 209-220.
76. <https://www.aricimarket.com/urun/yerli-dogal-bal-mumu>. 15 Kasım 2021.
77. Tulloch, A. P., Beeswax-Composition and Analysis, Bee World, 61,2(1980) 47-62.
78. <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi>. 15 Kasım 2021.
79. Yiğitbaşoğlu, H., Türkiye için önemli bir maden: Bor, Coğrafi Bilimler Dergisi, 2,2(2014) 13-25.
80. <https://www.hukukcukafasi.com/bor-kullanim-alanlari-ve-turkiyede-onemi/>. 15 Kasım 2021.
81. www.tubitak.gov.tr. TÜBİTAK Bor Raporu. 15 Kasım 2021.
82. www.milliyet.com.tr. Türkiye Bor Madeni Haritası. 15 Kasım 2021.

83. Taşgın, Y., Katalizör Olarak Katılan Bor Oksit ve Borik Asidin Polyester Üzerindeki Etkilerinin Mekanik ve Mikroyapı Açısından İncelenmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30,2(2018) 303-311.



ÖZGEÇMİŞ

Yavuz Selim İlköğretim Okulunda ilköğretimini ve Adıyaman Fen Lisesinde ortaöğretimini tamamladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2019 yılında İnşaat Mühendisliği lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2021 yılında Ahi Evran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. ŞAHAN ingilizce bilmekte ve halen Ahi Evran Üniversitesi'nde araştırma görevlisi görevine devam etmektedir.

