

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASPIR YAĞI VE BORİK ASİT İÇERİKLİ ORGANİK KATKININ BİTÜMÜN
FİZİKSEL VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Demet ŞAHİN

EKİM 2017

TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASPIR YAĞI VE BORİK ASİT İÇERİKLİ ORGANİK KATKININ BİTÜMÜN FİZİKSEL
VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Demet ŞAHİN

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 18 / 10 / 2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Demet ŞAHİN Tarafından Hazırlanan**

**ASPIR YAĞI VE BORİK ASİT İÇERİKLİ ORGANİK KATKININ BİTÜMÜN FİZİKSEL
VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

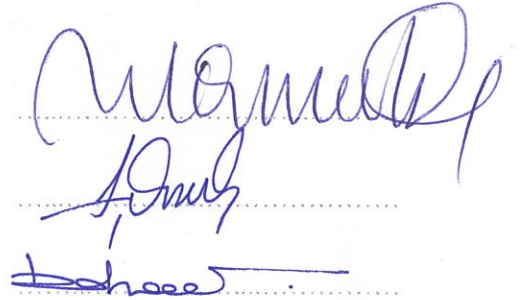
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 10 / 2017 gün ve 1721 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Kemal SANCAK

Üye : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bahadır YILMAZ



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

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

“Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında beni destekleyen, daha iyi ve güzel çalışmalar için devamlı teşvik eden değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Şeref ORUÇ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Organik katkı maddesinin elde edilmesinde bana yardımcı olan ve tez çalışmamın her aşamasında beni destekleyen, yardımlarını esirgemeyen KTÜ-Kimya Bölümü değerli hocalarından Sayın Prof. Dr. Kemal SANCAK'a teşekkür ederim.

İsfalt A.Ş. laboratuvarında Force düktilite deneyini yapmama yardımcı olan ve destek olan laboratuvar mühendisi Meryem KAYA'ya, laboratuvar ortamındaki tüm imkanlardan yararlanmam konusunda yardımcı olan İsfalt A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı İbrahim SÖNMEZ'e teşekkür ederim.

Tezin hazırlanması ve deney aşamalarında bana destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Bayburt Üniversitesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Bahadır YILMAZ'a, tezime olan katkıları ve tüm destek ve yardımları için meslektaşım İnşaat Yüksek Müh. Elif GİRDAP'a, Yüksek lisans eğitimim ve tez aşamasında bana destek olan, her anımda yanımda olan teyzem Fatoş KİBAR ve ailesine, meslektaşım Sebahat KARACA'ya ve kuzenim Merve ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olan, bana güven veren, destek ve yardımları ile bugünlere gelmemi sağlayan çok değerli babam Müslim ŞAHİN, annem Hatice ŞAHİN ve kardeşlerim Oğuzhan, Sümeyye ve Meryem ŞAHİN'e minnet ve şükranlarımı sunmayı hayatımın sonuna kadar borç bilirim.

Demet ŞAHİN
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. 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. 18/10/2017

Demet ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	26
1.4. Bitüm	28
1.4.1 Bitümün Kimyasal Yapısı	29
1.4.2 Bitümün Reolojisi.....	30
1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	30
1.5.1. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler.....	31
1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi.....	31
1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi.....	31
1.5.1.3. Düktilite Deneyi	32
1.5.1.4. Force Düktilite Deneyi	32
1.5.1.5. Özgül Ağırlık Deneyi	33
1.5.1.6. Frass Kırılma Noktası Deneyi	33
1.5.1.7. Parlama Noktası Deneyi.....	34
1.5.1.8. Çözünürlük Deneyi.....	34
1.5.1.9. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi	34
1.5.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri	35
1.5.2.1. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (DSR)	35
1.5.2.2. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (BBR)	37

1.5.2.3. Dönel Viskozite Deneyi (RV)	38
1.5.2.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	39
1.5.2.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV)	40
1.6. Bitümün Modifiye Edilmesi	40
1.6.1. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri	41
1.7. Yağlar	45
1.8. Aspir Bitkisi ve Yağı	46
1.9. Bor	48
1.10. Yapısal Analiz Metodları	51
1.10.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	51
1.10.2. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)	52
2. MATERYAL VE YÖNTEM	53
2.1. Bitümlü Bağlayıcı	54
2.2. Saf Bitüme Uygulanan Deneyler	54
2.2.1. Saf Bitümün Yapısal Analizi	54
2.2.2. Geleneksel ve Superpave Deneyleri	55
2.2.2.1. Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı	55
2.2.2.2. Penetrasyon Deneyinin Yapılışı	56
2.2.2.3. Düktilite Deneyinin Yapılışı	57
2.2.2.4. Force Düktilite Deneyi Yapılışı	58
2.2.2.5. RV Deneyinin Yapılışı	59
2.2.2.6. DSR Deneyinin Yapılışı	59
2.2.2.7. RTFOT Deneyinin Yapılışı	60
2.3. Aspir Yağı	62
2.4. Borik Asit	62
2.5. Bitümün Modifiye Edilmesi	62
2.5.1. Modifiyerin (Katkının) Elde Edilmesi	62
2.5.2. Modifiyerin Bitüme Katılması	63
2.6. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler	64
2.6.1. Modifiye Bitümün Yapısal Analizi	64
2.6.2. Modifiye Bitümlere Uygulanan Geleneksel ve Superpave Deneyleri	64
3. BULGULAR VE İRDELEME	66
3.1. Sentezlenen Katkının FT-IR Analizi Sonuçları	66

3.2.	Orijinal ve Farklı Katkı Oranlarındaki Modifiye Bitümlü Bağlayıcıya İlişkin FT-IR Analiz Sonuçları	68
3.3.	Orijinal ve Modifiye Bitüm Numunelerinin SEM Analiz Sonuçları	69
3.4.	Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	71
3.5.	Düktilite Deneyi Sonuçları	73
3.6.	Force Düktilite Deneyi Sonuçları	73
3.7.	Dönel Viskozimetre Deneyi Sonuçları (RV).....	76
3.8.	Dinamik Kesme Reometresi Deneyi Sonuçları	78
3.9.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Sonuçları (RTFOT)	81
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
5.	KAYNAKLAR.....	88
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ASPIR YAĞI VE BORİK ASİT İÇERİKLİ ORGANİK KATKININ BİTÜMÜN
FİZİKSEL VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Demet ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şeref ORUÇ
2017, 99 Sayfa

Bu tez çalışmasında, aspir yağı ve borik asitin sülfirik asit katalizörlüğünde laboratuvar ortamında kimyasal olarak karıştırılmasıyla yeni bir katkı maddesi sentezlenmiş olup, sentezlenen katkı maddesinin bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, sentezlenen katkı maddesi 50/70 penetrasyonlu bitüme bitüm ağırlığının %0,3, %0,5 , %0,7 ve %1 oranlarında katılarak modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen katkı maddesinin yapısal özellikleri Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analiz yöntemi ile belirlenirken, saf ve modifiye bitümlerin morfolojik yapısı ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile ortaya konulmuştur. Bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini belirleyebilmek için, saf ve modifiye bitüm numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, force duktilite, dinamik kayma reometresi (DSR), dönel viskozimetre (RV), İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, sentezlenen katkının saf bitümün tekerlek izi ve yaşlanma direncini, işlenebilirliğini, gerilme performansını arttırdığı, uzama özelliklerini geliştirdiği, bunun yanı sıra sıcaklık hassasiyetini azalttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitkisel yağ, aspir yağı, borik asit, modifiye bitüm, katkı maddesi

Master Thesis

SUMMARY

EFFECTS OF SAFFLOWER OIL AND BORIC ACID- CONTAINING ORGANIC ADDITIVES ON THE PHYSICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMEN

Demet ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2017, 99 Pages

In this study, a new additive substance synthesized by chemical mixing of safflower oil and boric acid in sulfuric acid catalysis in the laboratory environment and the effects of the synthesized additive on the physical and rheological properties of the bitumen were investigated. In this context, modified bitumen samples obtained by adding 0,3%, 0,5%, 0,7% and 1% (bitumen weight) of the synthesized additive substance with 50/70 penetration bituminous. Structural properties of the obtained additive determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) analysis method, while the morphological structure of pure and modified bitumen determined by Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. In order to determine the physical and rheological properties of the bituminous binder, penetration, softening point, ductility, force ductility, dynamic shear rheometer (DSR), rotational viscometry (RV) and rolling thin film oven test (RTFOT) tests were applied to the pure and modified bitumen samples. As a result of the experiments, it has been observed that the synthesized contribution improves the pure bitumen trace and aging resistance, machinability, tensile performance, elongation properties as well as temperature sensitivity.

Key Words: Vegetable oil, safflower oil, boric acid, modified bitumen, additive substances

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Ham petrolden bitüm elde edilme adımları	28
Şekil 2.	Bitümün kimyasal yapısı ve bileşenleri	29
Şekil 3.	DSR deneyi deformasyon yönleri	36
Şekil 4.	Bitümlü bağlayıcının viskoelastik özelliği.....	36
Şekil 5.	Sünme oranı (m) değerinin elde edilmesi	38
Şekil 6.	Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi	46
Şekil 7.	Aspir bitkisi.....	46
Şekil 8.	Türkiye’de aspir bitkisinin üretiminin yapıldığı bölgeler ve şehirler	48
Şekil 9.	Bor bileşeninin görünümü.....	49
Şekil 10.	Dünya bor rezervleri	50
Şekil 11.	Türkiye’de bor yataklarının bulunduğu şehirler	50
Şekil 12.	Borik asit.....	51
Şekil 13.	FT-IR Spektrometresi cihazı.....	54
Şekil 14.	SEM cihazı (1) ve karbon bant üzerindeki modifiye bitüm numuneleri (2).....	55
Şekil 15.	Yumuşama noktası deney adımları	56
Şekil 16.	Penetrasyon aleti ve deney yapılış adımları	56
Şekil 17.	Düktilite deneyinin yapılış adımları.....	57
Şekil 18.	Force düktilite deneyi numuneleri ((a) oda sıcaklığında, (b) su banyosunda)....	58
Şekil 19.	Force düktilite deneyinin yapılışı.....	58
Şekil 20.	Brookfield Viskozimetre deney aleti	59
Şekil 21.	DSR deney aleti	60
Şekil 22.	RTFOT deney numuneleri ve yapılış adımları	61
Şekil 23.	Katkı maddesinin elde edilme aşamaları	63
Şekil 24.	Modifiye bitüm numunelerinin elde edilmesi	64
Şekil 25.	Aspir yağının FT-IR spektrumu (Spektrum1).....	66
Şekil 26.	Sentezlenen katkının FT-IR spektrumu (Spektrum2)	67
Şekil 27.	Orijinal bitümün FT-IR spektrumu (Spektrum 3).....	68
Şekil 28.	Farklı oranlarda katkı ilaveli bitüme ilişkin FT-IR spektrumu (Spektrum 4).....	69

Şekil 29. % 10 katkılı modifiye bitümün FT-IR spektrumu (Spektrum 5)	69
Şekil 30. SEM görüntüleri; (1) Orijinal, (2)%0,3 katkılı, (3) %0,5 katkılı, (4) %0,7 katkılı, (5) %1 katkılı bitümlü bağlayıcı numuneleri.....	70
Şekil 31. Yumuşama noktası deneyi sonuçları grafiği.....	72
Şekil 32. Penetrasyon deneyi sonuçları grafiği	73
Şekil 33. Penetrasyon İndeksi grafiği.....	73
Şekil 34. Düktilite deney sonuçları	74
Şekil 35. +5 °C sıcaklıkta Kuvvet (N) – Uzama (mm) grafiği.....	75
Şekil 36. +10 °C sıcaklıkta Kuvvet (N) – Uzama (mm) grafiği.....	76
Şekil 37. Saf ve katkılı bağlayıcı numunelerinin 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri	77
Şekil 38. Orijinal ve katkılı bitümlerin sıcaklık- viskozite grafiği.....	77
Şekil 39. 64°C sıcaklıkta δ değerleri	79
Şekil 40. 64°C sıcaklıkta G^* değerleri	80
Şekil 41. 64°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	80
Şekil 42. RTFOT deneyi sonrası elde edilen penetrasyon değerleri.....	82
Şekil 43. RTFOT deneyi sonrası elde edilen yumuşama noktası değerleri	82
Şekil 44. RTFOT deneyi öncesi ve sonrasında elde edilen yumuşama noktası sıcaklık farkları	83
Şekil 45. RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri	84

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım hedefleri, performans parametreleri..	35
Tablo 2. Bağlayıcı performans sınıfı ve PAV deney sıcaklık aralıkları	40
Tablo 3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin sınıflandırılması	42
Tablo 4. Yaygın kullanılan bazı katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkisi	43
Tablo 5. Yaygın kullanılan bitümlü bağlayıcı katkılarının bozulmalara etkileri.....	44
Tablo 6. Aspir bitkisinin kullanım alanları	47
Tablo 7. Aspir yağına ait özellikler.....	47
Tablo 8. Türkiye’de yetiştirilen aspir türleri ve özellikleri.....	48
Tablo 9. Ticari alanlarda önemli bir yeri bulunan bor mineralleri ve bileşikleri.....	49
Tablo 10. Türkiye’de bor rezervlerinin dağılımı (Mineral bazında-2015)	50
Tablo 11. Deneyler sonucu saf bitüme ait elde edilen fiziksel özellikler	61
Tablo 12. Borik Asit’e Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	62
Tablo 13. Saf ve farklı oranlarda modifiye bitüme ait belirlenen fiziksel özellikler.....	65
Tablo 14. Penetrasyon, yumuşama noktası ve PI değerleri	72
Tablo 15. Force düktilite deney sonuçları	75
Tablo 16. Dönel Viskozimetre (RV) deney sonuçları, cP	76
Tablo 17. Orijinal ve modifiye bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları	78
Tablo 18. DSR deneyinde elde edilen sonuçlar	79
Tablo 19. RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri.....	82
Tablo 20. RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları	83

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Akrilonit Butadien Stiren
AC	: Asfalt Çimentosu
AG	: Amerikan Gilsoniti
AH	: Aromatik Hidrokarbon
APP	: Amorf Polyolefin Polimer
ASA	: Akrilat Stiren Akrinolitnil
B	: Bor
b	: Numune genişliği
BA	: Borik Asit
BBR	: Eğilme Kirişi Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
C	: Karbon
C-A	: Fındık Kabuğundan Elde Edilen Aktif Karbon Bileşenleri
CBE	: Siklit Borat Ester
CBp	: Pirolitik Karbon Siyahı
cm	: Santimetre
cP	: Santipoise
CR	: Öğütülmüş araç lastiği
CRM	: Öğütülmüş araç lastiği katkılı bitüm
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
dmm	: Desimilimetre
DSA	: Diferansiyel Yüzey Analizi
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DSR	: Dinamik Kayma Reometrisi
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
DWB	: Suyu Alınmış Biyoyağ
EA	: Etilen Akrilat
EBA	: Etilen-Butil- Akrilat

ECB	: Etilen- Kopolimer- Bitüm
EDS	: Taramalı Elektron Mikroskobu Tekniği
EPDM	: Etilen-Proclendien Harmoliper
ESCA	: Elektron Spektroskopisi
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
FAC	: C Sınıfı Uçucu Kül
FAF	: F Sınıfı Uçucu Kül
FR	: Furan Reçinesi
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
g	: gram
G*	: Kompleks modülü
G'	: Kayıp Modülü
G''	: Depolama Modülü
H	: Hidrojen
h	: Numune Yüksekliği (mm)
H18	: Pirolitik yağ
HMA	: Sıcak Asfalt Karışımı
IG	: İran Gilsoniti
IR	: Kızılötesi Spektroskopisi
ITS	: Dolaylı çekme dayanımı testi
ITSM	: Dolaylı çekme dayanımı modülü testi
J	: Joule
kg	: Kilogram
KJ	: Kilojoule
kPa	: Kilopascal
L	: Mesnetler Arası Mesafe
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
m	: Metre
m	: Sünme Oranı
M1	: Numunenin Yaşlanmadan önceki kütlesi
M2	: Numunenin Yaşlandıktan Sonraki numunesi
MB	: Modifiye Bitüm
MBOC	: Borik Asit Kökenli Melas Katkıları

MDSC	: Modülasyonlu Diferansiyel Taramalı Kalorimetre testi
ME ve WB	: Farklı Oranlarda Doğal Bitüm Mumu İçeren Bitüm (160/220)
Micro WCO _s	: Atık Pişirme Yağı içeren mikrokapsüller
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
MSCR	: Multiple- Stress Creep Recovery
MW	: Montan Wax
N	: Numuneye uygulanan yük
NPMB	: %2,5 EVA, %1 Elvoley RET ve %1 SBS içeren polimer modifiyeli bitüm
NR	: Doğal Kauçuk
NV	: Mum içermeyen bitüm (160/220)
O	: Pamuk tohumu yağı
OB	: Orijinal Biyoyağ
°C	: Santigrat derece
OFA	: Asitle işlenmiş atık uçucu kül yağı
P	: Maksimum Yük
Pa	: Pascal
Pa.s	: Pascal Saniye
PAV	: Basıncılı Yaşlandırma Kabini
Pen25	: Bitümün 25°C'deki penetrasyon değeri
PG	: Performans Aralığı
PI	: Penetrasyon İndeksi
PPA	: Polifosforik Asit
PR	: Polyester Reçine
PTFE	: Politetrafloretillen
PVC	: Polivinil Klorid
PW	: Polietilen Wax
R	: Gençleştirici katkı maddesi
RA-A	: Furfural Özü Yağı, yağlama baz yağı ve düşük sıcaklık performans artırıcı katkı içeren yeni geri dönüşüm katkı maddesi
Rad	: radyan
RGP	: Geri dönüştürülmüş cam tozu
RPE	: Geri dönüştürülmüş polietilen

Rpm	: Dakikada devir sayısı
RTFOT	: İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
RV	: Dönel Viskozimetre
S	: Sasobit
S	: Sünme Rijitliği
SB	: Stiren Butadien di Blok
SBR	: Stiren- Butadien Kauçuğu
SEBS	: Sitren-Etilen-Butilen-Sitren
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SENB	: Basit Kenarlı Dişli Kiriş Testi
SMA	: Stone Mastic Asphalt
sn	: Saniye
TB	: İşlenmiş Biyoyağ
TFOT	: İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
TG	: Termogravimetrik Analiz
Tg	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
TLA	: Trinidad Gölü Asfaltı
TPB	: Trinidad Petrol Bitümü
TPMB	: Türkiye’de Bulunan Polimer Modifiyeli Bitüm
TSRST	: Numunede Ölçülü Termal Gerilme Testi
UR	: Ultraviyole Spektroskopisi
UTB	: Atık Keresteden Elde edilen İşlenmemiş Biyo-yağ
W	: Atık pişirme yağı
WCO	: Atık pişirme yağı
WTR	: Atık Tekerlek Lastiği
XRD	: X- ray Difraksiyonu
YN	: Yumuşama Noktası
γ -HDPER	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
δ	: Faz Açısını
$\delta(t)$	: T Anındaki Defleksiyon

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde nüfusun hızla artması, otomotiv sektöründeki gelişmelerin artması, buna bağlı olarak yol üst yapılarının maruz kaldığı trafik hacimlerindeki aşırı artışın yanısıra ağır trafik yüklerinden ve sıcak iklim şartlarından dolayı yol üst kaplamalarında kalıcı deformasyonlar (tekerlek izinde oturmalar), yorulma çatlakları ve soğuk iklim şartlarından dolayı termal çatlaklar gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu tür bozulmalar yol kalitesinin ve kullanım ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu amaçla, yol üst yapısının kullanım ömrünün ve kalitesinin artırılmasına yönelik olarak yol kaplamalarının performansını iyileştirmek için bir çok ülkede, bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri katılarak modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir.

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir [1]. Bitüm modifikasyonu ve performansının geliştirilmesi için çeşitli polimerler [2-4], karbon kökenli malzemeler [5-7], bitkisel atık yağlar [8-10] ve farklı hammaddelerden üretilmiş çeşitli modifiyerler ve atık malzemeler [11-13] kullanılmaktadır. Dünyada kullanılan modifiyerlerin ortalama %75'ini elastomerik katkılar, %15'ini plastomerik katkılar, geriye kalan %10'unu da kauçuk ve diğer katkılar oluşturmaktadır [14-16].

Aspir bitkisi kuraklığa dayanıklı bir yağ bitkisidir. Aspir bitkisi %20-25 oranında yağ içeren tohumlara sahiptir [17]. Aspir yağı %90-93 oranında doymamış yağ asitini içinde bulundurur [18]. Aspir bitkisinin renkli çiçekleri gıda ve kumaş boyasında kullanılırken, yağı sabun, boya, vernik, cila ve biyodizel üretiminden kullanılmaktadır [19]. Aspir bitkisinin dünyadaki üretim miktarı ile karşılaştırıldığında Türkiye'deki üretiminin çok az olduğu söylenebilir. Buna rağmen, olumsuz koşullarda bile yetişebilme özelliği, kolay elde edilebilmesi, maliyetinin düşük olması, yemeklik yağ kullanımına ve biyodizel üretimine alternatif bir hammadde olması son yıllarda ülkemizde aspir bitkisine olan rağbetin artması ve üretiminin yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Birçok endüstri dalında yaygın bir şekilde kullanılan bor madeni ve çeşitleri, stratejik olarak değerli bir maden olmasından dolayı bor minerallerine özel bir konum kazandırmıştır [20]. Bor madeni, ülkemizin en önemli madenlerinin başında gelmektedir ve dünyadaki bor yataklarının yaklaşık %73'ü ülkemizde bulunmaktadır [21].

Günümüzde, bor ürünlerinin ve bitkisel atık yağların bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla ayrı ayrı çalışmalar yapılmış ve bu iki katkının birlikte kullanılması üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bitkisel yağ çeşitlerinden biri olan aspir yağının ise bitümlü bağlayıcıların modifiyesinde kullanılmadığı literatür araştırmasında görülmüştür. Böylece, aspir yağı ve borik asit katkısının birlikte kullanılmasıyla yeni bir katkı maddesi üretmek, üretilen katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amaçlı bu çalışmaya girilmiştir.

1.2. Literatür Özeti

Günümüze kadar, yol üst yapı kaplamalarının kalitesini artırmak ve performansını iyileştirmek için bitümlü bağlayıcılara ve karışımlara çok farklı tipte ve oranlarda katkı maddeleri eklenmesiyle elde edilen bitüm modifikasyonunu konu alan pek çok çalışma yapılmış ve hala yapılmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Chaalal vd. [22] tarafından, pirolitik karbon siyahı (CBp) 150/200 penetrasyon sınıfındaki bitümle %5 ve %30 konsantrasyon aralığında karıştırılarak elde edilen modifiye bitümün reolojik özellikleri ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Elektron (ESCA), kızılötesi (IR) ve ultraviyole (UR) spektroskopisi kullanılarak CBp ve bitüm bileşenleri arasındaki etkileşimler incelenmiştir. Sonuç olarak, %30 oranında CBp karışıma eklendiğinde bitümün sıcaklık hassasiyeti azalırken, kayıp modülü G' ve depolama modülü G'' önemli bir şekilde artmıştır. Pratik uygulamalarda bitüme CBp eklenmesiyle yumuşama noktasını, penetrasyonun sıcaklık hassasiyetini ve viskozitenin sıcaklık hassasiyetini geliştirmiştir. Ayrıca, CBp'nin asfaltten ve malten bileşenli bitümlerle fiziksel ve kimyasal etkileşim gösterdiği ortaya konulmuştur.

Lu vd. [23] tarafından, B85 (1 tane) ve B180 (2 tane) sınıfındaki 3 farklı bitüme (sırasıyla A, B, C) Sitren- Etilen- Butilen- Sitren (SEBS), Etilen- Vinil- Asetat (EVA) ve Etilen- Butil- Akrlat (EBA) polimerleri farklı konsantrasyonlarda katılarak bitümün reolojik özellikleri incelenmiştir. A ve C bitümüne polimerlerin her birinden bitümün

ağırlığının %6'sı oranında katılmıştır. B bitümüne ise polimerlerin her birinden bitüm ağırlığının %3, %6, %9'u oranlarında katılmıştır. Modifiye bitümlerin reolojik özellikleri dinamik mekanik analizler ve Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) testi yoluyla incelenmiştir. Analizler ve deneyler sonucunda, polimer modifikasyonunun bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklıklardaki elastik tepkisini ve dinamik modülünü arttırdığı ve düşük sıcaklıklarda bağlayıcının kompleks modülünü ve sertlik modülünü azalttığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca, polimer modifikasyonu sonucunda sıcaklık hassasiyeti ve camsı geçiş sıcaklığı özelliklerinin azaldığı gözlenmiştir.

Edwards vd. [24] tarafında, 160/220 penetrasyon sınıfındaki üç farklı bitüme üç farklı ticari mum (sasobit (S), montan wax (MW), polietilen wax (PW)) ve polifosforik asit (PPA) katılarak bu katkıların bitümün düşük sıcaklıktaki performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Saf (orijinal) bitüme sasobit, montan wax ve polietilen bitüm ağırlığının %3-%6 oranlarında katılırken polifosforik asit bitüm ağırlığının %0,4-%1'u oranlarında katılmıştır. Bu çalışma kapsamında saf ve modifiye bitüme RTFOT, Basıncılı Yaşlandırma Kabini (PAV), DSR, BBR, Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC), düktilite, penetrasyon, yumuşama noktası ve frass kırılma noktası deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, bitümün reolojisi üzerindeki etkinin büyüklüğünün ve tipinin bitümün kendisine bağlı olduğu kadar katkının miktarına ve tipine de bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, PW veya PPA katkısı düşük sıcaklıkta bitümü daha az sert yaparken, S katkısının sertliği arttırdığı ortaya koyulmuştur. Son olarak, özellikle mum içermeyen 160/220 penetrasyon sınıfındaki bitüme PW veya PPA eklendiğinde düşük sıcaklıktaki reolojik özellikler üzerinde bazı pozitif etkiler gösterdiği tespit edilmiştir.

Edwards vd. [25] tarafından, mum içermeyen (NV) ve farklı miktarlarda doğal bitüm mumu içeren (ME ve WB) 160/220 penetrasyonlu üç farklı bitüme ağırlığının %6'sı oranında polietilen wax ve Ft-Parafin ayrı ayrı eklenerek modifiye asfalt karışımının düşük ve orta sıcaklıktaki performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için, numunede ölçülü gerilme testi (TSRST), dinamik sünme testi, ve kompleks modülü testi kullanılmıştır. Sonuç olarak, bağlayıcı testleri sonucu bitümde gözlenen önemli fiziksel sertleşme TSRST sonucunda gözlenememiştir. Bu sonuç, düşük sıcaklıktaki fiziksel sertleşmenin asfalt karışımının çatlama özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığı ya da TSRST'nin bu etkiyi göstermek için uygun bir test olmadığı şeklinde yorumlanmıştır. Dinamik sünme testi sonucunda, en küçük gerimeler en iyi tekerlek izi direnci gösteren FT-Parafin ve NV bitüm içeren asfalt karışımları için kaydedilmiştir.

Kompleks modül testi sonucunda ise, %6 oranından ticari mum eklenmesiyle kompleks modülü artarken faz açısının azaldığı ve polietilen mumu içeren karışımla karşılaştırıldığında FT-Parafin içeren karışımda daha belirgin bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Doğan [26] tarafından, polimer tipinin ve konsantrasyonun bitüm bazlı kompozitlerin termal, mekanik özellikleri ve morfolojisinin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bitüm ağırlığının %5, %10, %20, %50'si oranında düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), SBS ve EVA katkıları kullanılarak modifiye bitümler elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, bitüme polimer katkıları eklenmesiyle bitüm bazlı kompozitlerin mekanik özellikleri artarken, erime akış indisi ve ısı iletkenlik değerlerinin düştüğü gözlenmiştir.

Metli [27] tarafından, SBS bazlı polimer modifiye bitümün ve bitümlü karışımların kaplama performansına etkileri incelenmiştir. Bitüm ağırlığının %2, %3, %4, %5, %6 oranında SBS bazlı polimer saf bitüme eklenerek 5 farklı tip modifiye bitüm elde edilmiştir. Saf ve katkılı bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon, ince film halinde ısıtma deneyi, ince film halinde ısıtma deneyi sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası ve depolanabilirlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca saf ve katkılı bitüm ile 54 adet Marshall briketi elde edilmiştir. Bu briketlerin 18 adeti kısa dönem yaşlandırılmış, 18 adeti uzun dönem yaşlandırılmış ve tüm numunelere indirek çekme gerilmesi deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kaplama tabakasının özelliklerinin geliştirilmesi üzerinde SBS polimerinin etkisinin çok büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, kaplama tabakasının performansının maksimuma ulaşması ve modifikasyon maliyetinin minimuma indirilmesi için optimum polimer içeriğinin saf bitüm ağırlığının %3'ü kadar olması gerektiği belirtilmiştir.

Sengoz ve Isikyakar [28] tarafından yapılan çalışmada, SBS (%2-%6) ve EVA (%3-%7) kopolimeri içeren (ayrı ayrı) 50/70 penetrasyonlu bitümlerin morfolojisi floresan mikroskopisi ile incelenmiş ve geleneksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, ince film halinde ısıtma deneyi (TFOT) ve depolama stabilitesi deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Ayrıca, SBS ve EVA polimer modifiyeli bitüm içeren sıcak asfalt karışımının (HMA) mekanik özellikleri Marshall testleriyle incelenmiştir. Deneyler sonucunda, yüksek polimer içeriğinde, örneklerde bitüm fazında süreklilik gözlenmesinin aksine düşük polimer içeriğinde, örneklerde sürekli bitüm fazındaki dağılmış polimer parçacıklarının var olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, polimer modifikasyonunun saf bitümün

geleneksel özelliklerini iyileştirdiği ortaya koyulmuştur. Buna ek olarak, polimer modifiyeli bitümle hazırlanan mekanik özellikler polimer içeriğinin artmasıyla iyileşmiştir.

Yılmaz ve Kök [29] tarafından, SBS katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve işlenebilirliğine etkisi araştırılmıştır. 100/150 penetrasyonlu bitüme, bitümün ağırlığının %2, %4 ve %6 oranlarında SBS ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılara RV, RTFOT ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda, SBS oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında artış olduğu ortaya konulmuştur. DSR deney sonuçlarına bakıldığında ise, artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanımın arttığı belirlenmiştir.

Ahmedzade ve Yılmaz [30] tarafından, polyester reçine (PR) katkısının bitümlü bağlayıcı ve karışımın üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında AC-5 ve AC-10 asfalt çimentosu kullanılmıştır. AC-10 asfalt bağlayıcıya ağırlığının %0,75, %1, %2 ve %3 oranında PR katkısı katılarak modifiye asfalt numuneleri elde edilmiştir. Ayrıca saf AC-10 ve AC-10+ %0,75 PR karışıma sırasıyla katılarak karışım numuneleri elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, AC-10+%0,75 PR katkılı modifiye bitümün AC-5 saf bitümlü bağlayıcıya göre daha iyi fiziksel özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, PR katkısının karışımın mekanik özelliklerini geliştirdiği belirlenmiştir.

Taşdemir [31] tarafından, asfalt betonu karışımının ve bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki performansı için 50/70 ve 160/220 penetrasyon sınıfındaki bağlayıcılara katılan FT-parafin ve polietilen mum katkılarının bağlayıcı ve karışım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Geleneksel test metotları, dinamik mekanik analiz (DMA) ve BBR testi yapılarak bağlayıcının özelliklerine karar verilmiştir. Asfalt betonunun yüksek sıcaklık özellikleri tekerlek izi testi yapılarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, FT-parafin ve polietilen mum katkılarının her iki bağlayıcı tipi için karışımın tekerlek izi direncini artırdığı tespit edilmiştir. FT-parafin modifiyeli asfalt karışımın en iyi tekerlek izi direncini gösterdiği belirlenmiştir. DMA sonuçlarına bakıldığında en yüksek sertlik etkisinin polietilen mum katkısı katıldığında elde edildiği fakat bu sonuçların asfalt karışım testleri tarafından doğrulanamadığı ifade edilmiştir.

Çubuk vd. [12] tarafından yapılan çalışmada, 50/70 penetrasyonlu bitüme %1-%6 arasında değişen oranlarda epoksi reçine katkısı katılarak bitümün performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Epoksi katkısının etkileri penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, DSC, RTFOT, BBR ve yüzey gerilme testleri uygulanarak ortaya konmuştur. Saf ve

modifiye edilmiş bitümlü agrega karışımlarının adezyonu ve stabilitesi Nicholson soyulma testi ve Marshall testleri yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bu deneyler sonucunda, optimum dozaj olarak belirlenen %2 oranında epoksi reçinesi bitüme ve karışıma eklenmesiyle ısı hassasiyeti, yüzey enerjisi, penetrasyon değeri ve soyulması azalırken viskozitesi, yumuşama noktası, camsı geçiş sıcaklığı, stabilitesinin arttığı ortaya konulmuştur.

Çolak [32] tarafından yapılan tez çalışmasında, öğütülmüş araç lastiğinin (CR) bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. B 160/220 sınıfı bitüme CR bitüm ağırlığının %3, %6, %9, %12 ve %15 oranında ve SBS katkıları %2-6 aralığında ayrı ayrı katılarak modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. İlk aşamada, CR katkılı bitümlere (CRM) geleneksel deneyler, DSR ve RV deneyleri uygulanıp, sonuçlar saf ve SBS modifiyeli bitüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise, CR ve SBS ile hazırlanan karışım numuneleri ve saf bitümle hazırlanan karışım numunelerine karışım testleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geleneksel bağlayıcı deney sonuçları katkı oranının artmasıyla SBS ve CR modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin düşürdüğünü ve bu özelliğin SBS katkısının katılmasıyla daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Reolojik bağlayıcı deney sonuçları incelendiğinde, SBS modifiyeli bağlayıcı ile aynı performansı elde edebilmek için CR oranının özellikle düşük frekanslarda SBS oranından çok yüksek değerlerde olması gerektiği tespit edilmiştir.

Demir [33] tarafından, 50/70 penetrasyonlu bitüme %2 Elvoley RET, %1 SBS ve %1 EVA katılarak modifiye bitümler elde edilmiştir. Elde edilen modifiye bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve elastik geri dönme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, modifiye bitümlere IR spektrumu (FT-IR) ve termogravimetrik analiz/diferansiyel termal analiz (TG/DTA) yapılmıştır. Deneyler sonucunda, penetrasyon ve düktilite değeri azalırken yumuşama noktası ve elastik geri dönmenin arttığı ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çalışmada, elde edilen modifiye bitümün sıcaklığa karşı dayanımını, mekanik çekme ve baskı darbelerine karşı dayanımını geliştirdiği ve bitüme elastikiyet kazandırdığı ortaya konulmuştur.

Çubuk vd. [34] tarafından, termoplastik polimerlerden olan ve ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretlen (PTFE) bitüme katılarak bitüm modifiye edilmiş ve bu katkı maddesinin bitümün reolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bitümün reolojik özelliklerini belirleyebilmek için 50/70 penetrasyonlu orijinal ve modifiye edilmiş bitüme viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, RTFOT, PAV ve BBR deneyleri ve performanslarına ilişkin ise Marshall stabilitesi ve soyulma deneyleri yapılmıştır. Katkı

maddesinin bitümün camsı geçiş sıcaklığına etkisi diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), yüzey enerjisine etkisi ise diferansiyel yüzey analizi (DSA) ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, katkı maddesinin katılmasıyla bitümün tekerlek izi oluşumunun yaklaşık %54 oranında azaldığı, yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunun ise yaklaşık %29 oranında azaldığı ortaya konmuştur.

Ameri vd. [35] tarafından, superpave testleri kullanılarak EVA ve Gilsonit modifiyerlerinin saf bitüm üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bitüm ağırlığının %2, %4, %6 oranında EVA katkısı ve bitüm ağırlığının %4, %8, %12 oranında Gilsonit katkısı ayrı ayrı katılarak modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlere DSR, BBR ve RV testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, iki katkı maddesinin de tekerlek izine karşı direnci geliştirdiği ve EVA katkısının, modifiye edilmiş bitümün yorulma çatlaklarına karşı direncini arttırdığı fakat Gilsonit katkısının tam tersi etki yaptığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca, düşük ve orta sıcaklıktaki EVA içeriği %2- %4 oranında iken bitümün düşük sıcaklıktaki çatlama direncini arttırdığı, buna rağmen %6 ve daha yüksek oranlarda katıldığında bitümün çatlama direncini azalttığı gözlenmiştir. Son olarak, gilsonit katkısının düşük sıcaklıklarda çatlama direncini azalttığı gözlenmiştir.

Baldino vd. [36] tarafından yapılan çalışmada, iki farklı 50/70 ve iki farklı 70/100 penetrasyonlu saf bitüme ağırlığının %0,5, %1, %1,5 oranlarında polifosforik asit (PPA) katılarak saf bitümün ve modifiye bitümün düşük sıcaklıklardaki reolojik özellikleri dinamik mekanik analizler yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda polifosforik asit katkısının etkilerinin büyük ölçüde bitümün bileşimine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Polifosforik asit katkısının saf bitümlerin camsı geçiş sıcaklığını azaltırken sertliğini artırdığı gözlenmiştir. Polifosforik asitin asfaltın düşük sıcaklıktaki performansını geliştirdiği ortaya konmuştur.

Aksoy vd. [37] tarafından, SBS polimeri ve yağ asidi türevli amin katılarak elde edilen modifiye asfaltların performans özelliklerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Üretilen geleneksel ve modifiye bitümlere dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanarak çatlama direnci incelenmiştir. Ayrıca, bu numunelere dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak karışımların yük dağıtma kapasitesi ve su hasarı problemi incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda, katkıların her ikisinin de mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca, SBS modifiyeli karışımların diğer katkıya göre daha yüksek esneklik modülü değeri verdiği ve çatlamaya karşı daha yüksek

direnç gösterdiği ortaya konmuştur. Su hasarı incelendiğinde ise, SBS modifiyeli karışımların performanslarının daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Ahmedzade vd. [38] tarafından, gama ışınına tabi tutularak yüzeyleri aktive edilen geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilenin (γ -HDPE_R) bitümlü bağlayıcılarda katkı maddesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. 160/200 penetrasyonlu bitüme, ağırlığının %1, %3, %5, %7, %9 oranlarında γ -HDPE_R katkısı katılarak 5 farklı karışım numunesi elde edilmiştir. Elde edilen numunelere geleneksel testler, RV, DSR deneyleri uygulanmıştır. Katkı maddesi arttıkça penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktası değerinin arttığı yani bitümün sertliğinin arttığı sonucu elde edilmiştir. Katkı maddesinin bitüme eklenmesiyle düktilite değerinin azaldığı yani bitümün uzama kabiliyetinin azaldığı tespit edilmiştir. RV deney sonuçları incelendiğinde, γ -HDPE_R katkısının bitüm içerisinde %5 oranında kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir. DSR deneyi sonuçlarına göre, katkı maddesinin eklenmesiyle bitümün tekerlek izine karşı direncinin arttığı gözlenmiştir.

Khadivar ve Kavussi [39] tarafından, ortalama kaplama sıcaklığında bitüme Stiren-Butadien- Rubber (SBR) ve Doğal kauçuk (NR) katılarak elde edilen modifiye emülsiyonlarının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında saf ve modifiye bitümlere geleneksel ve reolojik testler uygulanmıştır. Ayrıca, lineer ve non- lineer modellerle reolojik özelliklerin belirlenmesi için sıcaklık sünme, çoklu gerilme kayması ve geri dönme testleri uygulanmıştır. Lineer bölgelerde, katkının varlığının bağlayıcının sertlik ve geri dönme özelliğini geliştirdiği belirtilmiştir. Non-lineer bölgelerde iki polimerin özellikleri kıyaslandığında, SBR katkısının NR'ye göre uygulama gerilmelerinde daha hassas özellik gösterdiği ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, NR katkısının bağlayıcının sertlik özelliğini artırdığı ifade edilmiştir.

Yılmaz vd. [40] tarafından yapılan çalışmada, saf ve %4 oranında SBS ve EVA polimeri içeren bitümlerle hazırlanan karışımların kalıcı deformasyonlara karşı dayanımları incelenmiştir. Çalışmada performans aralığı PG 58-34 olan bitüm kullanılmıştır. Karışım numuneleri %4 oranında boşluk olacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, karışım numunelerine DSR, RTFOT, PAV, BBR ve RV deneyleri yapılmıştır. RV deney sonuçları incelendiğinde, özellikle EVA kullanımı ile daha yüksek sıcaklığa gerek olacağı tespit edilmiştir. DSR deney sonuçlarına göre ise kullanılan katkıların tekerlek izine karşı direnci arttırdığı ve tekerlek izine karşı en etkili katkının EVA olduğu tespit edilmiştir.

Brovelli vd. [3] tarafından, A (70/100), B (50/70), C (35/50) penetrasyon sınıfındaki üç farklı bitüme %3, %6 ve %9 (bitüm ağırlığının) oranlarında EVA polimeri katılarak elde edilen modifiye bitümün reolojik özellikleri ve bunların bitüm betonunun özellikleriyle korelasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bitümün reolojik özelliklerini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyi yapılmıştır. Veriler partikül süspansiyonu için geliştirilen reolojik modellerle ve polimer karışımları için Palierne modeli yardımıyla analiz edilmiştir. Sonuç olarak, eklenen EVA miktarı arttıkça ısıya duyarlılığın azaldığı, bitüm üzerinde sertleştirici etki gösteren penetrasyon indeksi ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı ve penetrasyon değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, EVA miktarı arttıkça yüksek sıcaklıkta görünen vizkozite değerinin arttığı görülmüştür. Buna ek olarak, analiz için kullanılan sıcaklık aralığı, frekans ve kayma oranının hepsinde bitümün EVA ile modifikasyonu böyle modeller tarafından açıklanamayabilir. Buna rağmen, mastikle ilgili tekerlek izi derinliği ve genç kompleks modülü ve polimer modifiyeli bitümün reolojik fonksiyonları arasındaki kuvvet yasası ilişkisi tanımlanabilir.

Kizirgil [41] tarafından yapılan tez çalışmasında, SBS ve uçucu külün birlikte kullanılmasının bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada kapsamında, bitüm ağırlığının %0, %3 ve %6 oranlarında SBS ve agrega ağırlığının %0, %2, %4 ve %6 oranlarında filler yerine uçucu kül kullanılarak 12 farklı karışım elde edilmiştir. Saf ve modifiye edilmiş numunelere Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Tüm deneyler bir arada değerlendirildiğinde, hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların stabilitelerinin, normal sıcaklıklardaki rijitliklerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, yorulma çatlaklarına karşı direncinin ve kalıcı deformasyona karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir.

Köfteci vd. [42] tarafından, 160/220 penetrasyonlu bitüme polivinil klorid (PVC) kökenli üç grup atık plastik (PVC_{pencere} , PVC_{panjur} , PVC_{kablo}) bitüm ağırlığının %1, %3, %5'i oranında katılarak modifiye edilmiş bitümün performansı değerlendirilmiştir. Saf ve modifiye bitümlere geleneksel testler ve RV, DSR ve BBR testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, %1-%3 oranında PVC_{pencere} ve PVC_{panjur} atıklarının yüksek sıcaklıklarda modifiye bitümün performansını geliştirdiği gözlenmiştir. Ayrıca, bu iki katkının bitümün yüksek sıcaklıktaki performansı üzerinde olumlu etkisi olmasına rağmen düşük sıcaklıktaki performansını etkilemediği sonucuna varılmıştır. Sadece %5 oranında PVC_{kablo} atığı

bitümün düşük sıcaklıktaki performansını geliştirmiştir. Son olarak, bitümde atık plastik kullanımının optimum miktarı olarak %3 oranında PVC_{pencere} atığına karar verilmiştir.

Ahmedzade vd. [43] tarafından, yüzey aktivasyonlu geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen polimerin (γ -HDPE_R) bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, bitüme geleneksel deneyler, RTFOT, PAV, RV, DSR, BBR deneyleri yapılmıştır. Katkı maddesinin yapısal analizi ise FT-IR spektrumu analizi ile belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda, katkı maddesinin bitümün yüksek sıcaklık performansını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca γ -HDPE_R katkılı bağlayıcının saf bitüme göre sıcaklık bakımından daha geniş bir kullanım aralığına sahip olduğu ortaya konmuştur.

Khodaii vd. [44] tarafından, yükleme frekansı ve sıcaklığın SBS modifiyeli asfalt karışımların nem hassasiyeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, %4,5 SBS polimeri ile modifiye edilmiş 85/100 penetrasyonlu bitüm ve silisli kırma taş agregası içeren 96 Marshall numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler dört farklı yükleme frekansında, dört farklı sıcaklıkta ve iki farklı nem şartında (kuru ve ıslak) her bir kombinasyondan üç tane numune olmak üzere test edilmiştir. Sonuç olarak, çeşitli yükleme frekansları ve sıcaklıkların her ikisinin de hem kuru hem de ıslak asfalt karışımlarının kalıcı gerilmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Kuru şartlar altındaki yükleme frekansı arttıkça kalıcı gerilmeler azalmıştır. Dört sıcaklık arasındaki en yüksek kalıcı gerilme en düşük yükleme frekansında ölçülmüştür. Diğer bir taraftan, ıslak şartlar altında yükleme frekansı arttıkça kalıcı gerilme oldukça artmıştır ve dört sıcaklık arasındaki en yüksek kalıcı gerilme en yüksek yükleme frekansında oluşmuştur.

Kök vd. [45] tarafından, 50/70 penetrasyonlu bitüme %2, %3, %4 oranlarında SBS ve Sasobit katkısı (ayrı ayrı ve birlikte) katılarak geleneksel ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, katkılı bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetleri incelendiğinde Sasobit katkılı bitümün SBS katkılı bitüme göre daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Katkılı bitümleri yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi parametreleri incelendiğinde ise, SBS katkılı bitümün Sasobit katkılı bitümden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, SBS katkılı bitümle karşılaştırıldığında Sasobit katkılı bitümün saf bitümün yumuşama noktasını önemli derecede artırdığı ve vizkozitesini azalttığı belirtilmiştir. Bu katkıların birlikte kullanılmasında ortaya çıkan etkilerin ayrı ayrı kullanılmasında ortaya çıkan etkilerden büyük ölçüde farklı olduğu ifade edilmiştir.

Sobolev vd. [46] tarafından, uçucu külün asfalt çimentosunun reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. 163 °C’de 1,5 saat ısıtılan PG 58-28 ve PG 70-22 sınıflarındaki iki tip bitüme ağırlığının %0, %5, %15, %30, %60 oranlarında C sınıfı uçucu kül (FAC) ve F sınıfı uçucu kül (FAF) içeren fillerler katılarak karıştırma işlemi yapılmıştır. Ayrıca fillerlerin mikroyapısının özelliklerini belirlemek için X-ray difraksiyonu (XRD), SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerini belirlemek için ise DSR deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak, uçucu kül içeren asfalt bağlayıcının mikro yapısı incelendiğinde düşük sıcaklıklarda uçucu kül parçacıklarının çatlak durdurma etkisine sebep olduğu ortaya konulmuştur. Uçucu kül eklendiğinde tekerlek izi faktörünün iyileştiği ve bağlayıcının daha yüksek bir performans sınıfına ulaştığı görülmüştür. Yani, her iki tip uçucu kül %60 oranında kullanıldığında referans bitümünün performans sınıfını PG 58’den PG 64’e yükseltmiştir. Aynı zamanda, 124 °C’de her iki tip bitümün dinamik viskozitesi artmıştır.

Xiao vd. [47] tarafından, Polifosforik asitli (PPA) ve polifosforik asitsiz SBS ve üç alternatif polimer modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki reolojik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, modifiye asfalt bağlayıcının (PG76-22) üretiminde iki temel asfalt bağlayıcı (PG 64-22), %3 SBS, %3 oksitlenmiş polietilen, %3 maleik anhidrit, %10 ufalanmış lastik kullanılmıştır. Polifosforik asit ise %0,5 oranında katılmıştır. Yapılan çalışmada dönel viskozite, $G^*/\sin \gamma$, faz açısı, titreşim genliği, frekans salınımı, sünme, sünme geri dönmesi, gevşemeyi içeren reolojik özellikler test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, iki alternatif polimer içeren PG76-22 sınıfındaki bağlayıcının SBS modifiyeli bağlayıcıya göre daha düşük viskozite değerine sahip olduğu ve bu yüzden de daha düşük karıştırma ve sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Ayrıca, %0,5 oranında eklenen polifosforik asidin PG76-22 sınıfındaki bağlayıcıyı üretmek için ihtiyaç duyulan polimer katkısını %1 oranında azalttığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca bu çalışma kapsamında incelenen modifiye bağlayıcıların diğer tüm reolojik özelliklerinin polimerin tipi, asfaltın kaynağı, test sıcaklığına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Yan vd. [48] tarafından, dönüştürülmüş düşük yoğunluklu polietilen (RPE) ve atık tekerlek lastiği (WTR) katılarak modifiye edilen asfalt bağlayıcının reolojik özellikleri üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, asfalta asfalt ağırlığının %5, %10, %15 oranında WTR ve %2, %3, %4, %5 oranında RPE katkıları katılarak modifiye asfaltlar elde edilmiştir. Onların reolojik özellikleri geleneksel testlerin yanı sıra BBR ve DSR testleriyle ölçülmüştür. Deneyler sonucunda ise, asfalt WTR ve RPE ile modifiye

edildikten sonra asfalt bağlayıcının penetrasyonu ve faz açısı azalırken yumuşama noktası, döneel viskozitesi ve kompleks modülü arttığı görülmüştür. Yani, WTR ve RPE katkılarının modifikasyonuyl a asfaltın orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin geliştiğı gözlenmiştir. Buna rağmen, WTR ve RPE modifikasyonunun asfaltın düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerini (sünme sertliğı ve m-value) azalttığı gözlenmiştir.

Brovelli vd. [49] tarafından, LDPE ve EVA katkısının kombinasyonundan elde edilen polimer ve amorf polyolefin polimer (APP) katkılarıyla modifiye edilmiş iki tip asfalt karışımının tekerlek izi direncini değerlendirmek üzere bir çalışma yapılmıştır. Bu katkılar karışıma asfalt ağırlığının %3, %6, %9 oranlarında katılmıştır. Tekerlek izi testi tekerlek izi aleti yardımıyla yapılmıştır. Asfalt karışımının performansını belirlemek için sertlik ve yorulma testi uygulanmıştır. Bu testler sonucunda, bu çalışmadaki polimer modifikasyonunun sertlik ve yorulma davranışından ödün vermeksizin tekerlek izi direncini geliştirdiğı gözlenmiştir. Tekerlek izi sonuçlarının NCHRP 1-37A modeli ile uyumlu olduğı belirtilmiştir. Ayrıca kalıcı deformasyonlar ve yorulmalara karşı APP katkısının daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Keyf [50] tarafından yapılan çalışmada, 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1 Elvaloy RET polimeri, %1 SBS polimeri ve %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında EVA polimeri katılmıştır. Saf ve modifiye edilmiş bitüme yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon, penetrasyon indeksi ve elastik geri dönme testleri uygulanmıştır. Bu testler sonucunda, katkı maddelerinin bitüme katılmasıyla bitümün penetrasyon ve düktilite değerleri azalırken, penetrasyon indeksi, yumuşama noktası ve elastik geri dönme performansının arttığı ortaya konmuştur. Ayrıca, %2,5 EVA, %1 Elvaloy RET ve %1 SBS içeren yeni polimer modifiyeli bitümün (NPMB) en önemli özellikleri Türkiye'deki 8 farklı tip polimer modifiyeli bitüm (TPMB) ile karşılaştırılmıştır. NPMB'nin iki farklı tip TPMB (TPMB 70-16 ve TPMB 70-22) için tüm gerekli parametreleri sağladığı gözlenmiştir.

Kim vd. [51] tarafından, PG 64/22 olan iki farklı saf bitüme bitüm ağırlığının %10'u oranında ufalanmış lastik katılarak modifiye bağlayıcı (CRM) elde edilmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcıya ağırlığının %1,5, %2,5, %3,5, %4,5 Ft-Parafin eklenerek Ft-Parafin içeriğinin modifiye bağlayıcının performans özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. RTFOT ve PAV deneyleriyle yaşlandırılan numunelere BBR, DSR, RV deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, 135 °C'de modifiye bağlayıcıya Ft-Parafin eklenmesiyle modifiye bağlayıcının viskozitesinin azaldığı tahmin edilmektedir. Ft-Parafin içeren

modifiye bağlayıcıların Ft-Parafin içermeyenlere göre tekerlek izine karşı direnci artırıcı etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını azaltmıştır. Ek olarak, Ft-Parafinin CRM bağlayıcıya katılmasıyla düşük sıcaklıklardaki çatlaklara karşı CRM bağlayıcıya göre daha düşük direnç gösterdiği belirtilmiştir.

Yilmaz ve Yalcin [52] tarafından yapılan çalışmada, asfaltın modifikasyonunda kullanılan SBS, Amerikan gilsoniti (AG), İran gilsoniti (IG) ve sulu kirecin sıcak asfalt karışımının (HMA) performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bitüm modifikasyonu için bitüm ağırlığı yüzdesi olarak %4 SBS, %11 AG ve %10 IG katkıları kullanılmıştır. Sulu kireç, agrega ağırlığının % 2 oranında filler malzeme olarak kullanılmıştır. Karışıma uygulanan deneyler sonucunda, hem HMA stabilitesi ve sertliği hem de su hasarına ve tekerlek izine karşı direnç artmıştır. Ayrıca sulu kirecin bağlayıcı katkısı olarak çok etkili olmadığı, stabilite, sertlik ve tekerlek izi bakımından en etkili katkının AG olduğu gözlenmiştir. Son olarak, su hasarına karşı direnç bakımından en etkili katkının SBS olduğu ifade edilmiştir.

Mubaraki [53] tarafından, yüksek sıcaklığa maruz kalan modifiye asfalt çimentosunun özellikleri karakterize edilmiş ve değerlendirilmiştir. Saf asfalt çimentosuna asfalt ağırlığının %3,5-%7 oranlarında Akrilat Stiren Akrilonitril (ASA) polimeri ve nano alüminyum oksit nanoparçacıkları (Al_2O_3) katılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, saf bitüme katılan ASA polimeri ve Al_2O_3 nano parçacıklarının yüksek sıcaklıkta asfalt çimentosunun reolojik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen modifiye asfalt çimentosunun depolama stabilitesi sonuçlarından asfalt çimentosu ve modifiyerler arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Her iki modifiyerin konsantrasyonu arttığında modifiye asfalt çimentosunun kompleks modülünün (G^*) arttığı gözlenmiştir. Her iki katkı için modifiye asfalt çimentosunun yüksek sıcaklıktaki tekerlek izine karşı direncinin çok iyi olduğu görülmüştür. Son olarak, modifiye asfalt çimentosunun sünme geridönme sonuçlarında artış sağlanmıştır ve her iki katkı için optimum katkı oranı %5 olarak belirlenmiştir.

Hong-liang vd. [54] tarafından, nano-parçacıklar ve polimer modifiyeli bitümlerin yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performansının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Modifiyer olarak, nano-zink oksit (nano-ZnO) parçacıkları, nano-titanyum dioksit (nano- TiO_2) parçacıkları, nano-kalsiyum karbonat (nano- $CaCO_3$) parçacıkları, SBS ve SBR katkıları kullanılmıştır. SK-70 bitüme sırasıyla %5 oranında nano-parçacık modifiyerleri katılırken, %3, %4 ve %5 oranında SBR ve %3,7, %4,2 ve %4,7 oranında

SBS katılarak modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Modifiye numunelere geleneksel deneyler yapılarak, 3% nano-ZnO/0,5% nano-TiO₂/ 3,7%SBS, 5% nano-ZnO/4,2% SBS, 5% nano-CaCO₃/4% SBR olmak üzere 3 farklı optimum karışım değeri elde edilmiştir. Bu optimum karışımlara DSR, TFOT ve BBR deneyi uygulanmıştır. Yapısal analizi için SEM ve FT-IR analizlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, nano parçacıkların bitümün yapısal özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, bitümün yüksek ve düşük sıcaklıktaki özelliklerini geliştirdiği ortaya konmuştur.

Bostancıoğlu ve Oruç [55] tarafından, furan reçinesi (FR) ve fındık kabuğunun vakum piroliziyle elde edilen aktif karbon bileşenleri (C-A) saf asfalta katılarak modifiye asfalt karışımları elde edilmiştir. Asfalt karışıma asfalt ağırlığının %10, %15, %20 oranlarında C-A ve %4, %5, %6 oranlarında FR katılarak elde edilen modifiye asfalt karışımlarının tekerlek izine karşı direnci ve su hasarı incelenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, katkıların Marshall Stabilitesini %9 oranında artırdığı ifade edilmiştir. Sertlik modülüne gelince, %10 C-A ve %5 FR içeren numunelerin en yüksek sertlik modülüne sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca C-A katkısı karışımın dayanıklılığını azaltmıştır. Modifiyer olarak C-A ve FR kullanılması ile karışım tekerlek izi direnci ve sertlik modülü bakımından yüksek performans göstermiştir. Son olarak su hasarına bakıldığında, C-A bozulurken FR modifikasyonunun dayanıklılığını artırdığı görülmüştür.

Bilondi vd. [56] tarafından yapılan çalışmada, 60/70 penetrasyonlu bitüme SBR, SBS, CR ve geri dönüştürülmüş cam tozu (RGP) katkıları katılarak asfalt betonunun fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Katkıların çeşitli kombinasyonlarının bitüme katılmasıyla bir dizi modifiye asfalt betonu numunesi elde edilmiştir. Tüm modifiye edilen numunelere Dolaylı Çekme Dayanımı Testi(ITS) , Dolaylı Çekme Dayanımı Modülü Testi(ITSM) ve Marshall stabilite testi yapılmıştır. Sonuç olarak, geridönüştürülmüş RGP katkısı ITS ve ITSM deney sonuçlarını önemli şekilde geliştirdiği görülmüştür. Ayrıca RGP katılarak elde edilen modifiye karışımların Marshall Stabilitesi daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, yeni RGP modifiyerinin yol kaplama performansında büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Rezaei vd. [57] tarafından, SBS polimeri ve nano silika (nano- SiO₂) bileşeninin bitüme katılmasıyla elde edilen modifiye bitümün düşük sıcaklıklardaki fonksiyonel analizi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Deneyler sonucunda, bitüme SBS polimeri ve bitüm ağırlığının %3 ve % 4 oranlarında nano SiO₂ katkılarının katılmasıyla bitümün düşük sıcaklıktaki performansının geliştiği ortaya koyulmuştur.

Rezaei vd. [58] tarafından, SBS polimeri ve nano- SiO_2 bileşeninin bitüme katılmasıyla elde edilen modifiye bitümün yüksek sıcaklıklardaki performansının analizi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Deneyler sonucunda, SBS polimeri ile modifiye edilmiş bitüme nano- SiO_2 eklenmesiyle modifiye bitümün kompleks modülü, faz açısı, tekerlek izine karşı direnci, depolama modülü, kayıp modülü ve yüksek sıcaklıktaki fonksiyonel performansının geliştiği ortaya koyulmuştur.

Imaninasab [59] tarafından, granüler polimerin polimer modifiyeli bitüme ve karışıma direk eklenmesi olarak belirlenen iki farklı tip modifikasyon sürecinin Ston Mastik Asfalt'ın (SMA) tekerlek izi performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada granüler polimer olarak Rheofalt katkısı ve Lucobit adlı Etilen –Kopolimer-Bitüm (ECB) katkısı kullanılmıştır ve bu katkıların tekerlek izine karşı direnci geliştirmeleri üzerindeki etkileri SBS modifiyeli bitüm ve modifiye edilmemiş bitümlü karışımlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, SMA'a Rheofalt katkısı direk eklendiğinde tekerlek izi performansını geliştirirken, ECB katkısı hiçbir gelişme göstermemiştir. Ayrıca, bitümle Rheofalt katkısının karıştırılması bu katkının karışıma direk eklenmesinden daha etkili olmuştur. SBS ve Rheofalt modifiyeli bağlayıcılar tekerlek izi performansı üzerinde hemen hemen aynı etkiye sahiptirler. Son olarak, Rheofalt ve SBS tekerlek izi performansını geliştirme bakımından ECB katkısından daha büyük bir etkiye sahiptir.

Yağların bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığı zaman;

Yousefi vd. [60] tarafından, kullanılmış lastikten türetilen pirolitik yağ kalıntısının polimer modifiyeli asfaltın özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Polimer modifiyeli asfalt, kullanılmış tekerlekten elde edilen pirolitik yağ ve geri dönüştürülmüş polietilenin (RPE) 58-28 performans sınıfındaki asfaltın içine katılmasıyla oluşturulmuştur. Yüksek sıcaklıklarda modifiye asfalt için yapılan kapsamlı bir karakterizasyon sonucunda asfaltın yüksek kalitede özellikler gösterdiği belirtilmiştir. Polimer katıldıktan sonra saf asfaltın düşük sıcaklıklardaki özelliklerinde bozulma ortaya çıkmıştır. %10 pirolitik yağ (H18) modifiyeli asfaltın düşük sıcaklıklardaki özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. %10 H18 ve %1 polimer içeren asfalt karışımının düşük ve yüksek sıcaklıklarda en iyi performansa sahip olduğu yapılan çalışmalar sonucunda bulunmuştur.

Taşcı [61] tarafından yapılan çalışmada, piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiyeli bitüm elde etmiş ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine olan etkisinin incelemiştir. Reolojik özelliklerini üzerindeki

etkilerini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme deneyi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), Kiriş eğilme deneyi (BBR) yapmıştır. Sıcak karışımdaki stabiliteye olan etkisini belirlemek için Marshall deneyi yapmıştır. Karışımlara uygulanan deneyler, ilave edilen katkı maddelerinin bitümün özelliklerini değiştirdiği sonucuna ulaştırmıştır. Modifiye edilmiş bitümün penetrasyon derecesi artmış, yumuşama noktası değeri ise azalmıştır. Bunun yanında atık lastik yağı, bitümün yaşlanma etkilerini azaltmıştır.

Asli vd. [62] tarafından, atık pişirme yağı (WCO) ile gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri üzerine bir çalışma yapılmıştır. 50/60, 40/50, 30/40 penetrasyon sınıfında 3 farklı yaşlanmış bitüm elde edilmiştir. Bu yaşlanmış bitümlere, bitüm ağırlığının %1-5 oranlarında WCO ilave edilmiştir. Orijinal, yaşlandırılmış ve gençleştirilmiş bitümün fiziksel özellikleri geleneksel bağlayıcı testleri yapılarak ölçülmüş ve karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde statik analizler kullanılmıştır. Sonuç olarak, yaşlandırılmış bitüme WCO katılmasıyla orijinal bitümün (80/100) fiziksel özellikleriyle benzerlik gösteren gençleştirilmiş bitümler başarıyla elde edilmiştir. 50/60, 40/50, 30/40 penetrasyon sınıfındaki yaşlanmış bitümleri gençleştirmek için kullanılan WCO katkısının optimum yüzdelerinin sırasıyla %1, %3-4, %4-5 olduğu tespit edilmiştir.

Zargar vd. [63] tarafından, yaşlanmış bitüm için yenileyici bir katkı maddesi olan atık pişirme yağının (WCO) kullanılması ihtimalini araştıran bir çalışma yapılmıştır. Saf bitüm (80/100) yaşlandırma işlemine tabi tutularak yaşlanmış bitüm (40/50) elde edilmiştir. Yaşlanmış bitüme, bitüm ağırlığının %1-%5 aralığında katkı maddesi katılarak modifikasyon yapılmıştır. Orijinal bitüme, yaşlanmış bitüme ve gençleşmiş bitüme yumuşama noktası, penetrasyon, vizkozite, DSR deneyleri ve FT-IR analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarında, %3-4 oranında WCO içeren yaşlanmış bitüm orijinal bitümün fiziksel ve reolojik özellikleriyle tıpa tıp benzer bir şekilde gençleştirilmiştir. Fakat saf ve gençleştirilmiş bitüm arasındaki yaşlanma eğiliminin karıştırma, taşıma ve yol üzerine serme işlemi esnasında farklı olduğu belirtilmiştir.

Parvez vd. [64] tarafından, asitle işlenmiş atık uçucu kül yağının (OFA) asfalt modifikasyonunda kullanılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Katkının asfalt içinde yayılması ve kimyasal olarak asfalta tutunmasını artırmak için karboksil gruplarıyla OFA'nın işlevselleştirilmesinde H_2SO_4 (Sülfirik) ve HNO_3 (Nitrik) asitleri kullanılmıştır. İşlenmiş OFA saf asfaltla (60/70) %2-8 (asfaltın ağırlığının) oranlarında karıştırılmıştır ve modifiye asfaltın yapısal ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Yapısal analizler sonucunda,

asfalt modifikasyonunda işlenmiş OFA ‘nın işlenmemiş OFA ‘dan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Reolojik testler sonucunda ise, işlenmiş OFA modifikasyonunun modifiye asfalt bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığı belirtilmiştir. % 8 oranında katkı maddesinin saf asfalta eklenmesiyle yüksek sıcaklıktaki performans sınıfının 70den 88’e artırdığı tespit edilmiştir. Dahası, asfalt bağlayıcıdaki işlenmiş OFA içeriğinin artması sonucunda tekerlek izi parametresi $G^*/\sin\delta$ arttığı belirtilmiştir. OFA’nın asfalta katılmasıyla birlikte aktivasyon enerjisinin azaldığı ve modifiye bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki çatlamaya karşı direncinin daha iyi olduğu görülmüştür. Son olarak, asitle işlenmiş OFA katkısının asfalt karışımının özelliklerini iyileştirdiği ifade edilmiştir.

Chen vd. [65] tarafından, gençleştirici katkı maddesi (R), atık pişirme yağı (W) ve pamuk tohumu yağı (O) katılarak gençleştirilen yaşlanmış asfaltın yüksek sıcaklıktaki reolojik özellikleri çalışılmıştır. 3 farklı kaynaktan elde edilen yaşlanmış asfaltlara, asfalt ağırlığının %0, %5 ve %10 oranlarında katkı maddeleri katılmıştır. Sonuç olarak, katkı oranı arttıkça gençleştirilmiş asfaltın kompleks modülü ve tekerlek izi direnci faktörünün azaldığı, faz açısının ise arttığı görülmüştür. Ayrıca atık W ve O katkılarının yaşlanmış asfaltın viskozite değerini çok az miktarda azalttığı ve bu yüzden karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının düştüğü ortaya konmuştur.

Wang vd. [66] tarafından, yaşlanmış asfaltı eski haline getirmek için furfural özü yağı, yağlama baz yağı ve düşük sıcaklıkta performans artırıcı bir katkı kullanılarak yeni bir geri dönüşüm katkı maddesi (RA-A) sentezlenmiştir. 50 A asfalt, 70 A asfalt ve AH-70 asfalt kullanılmıştır. RTFOT deneyi yapılarak bu üç tip asfalt yaşlandırılmıştır. RA-A bu üç tip yaşlanmış asfalta, asfaltın ağırlığının %6, %8, %10 oranlarında katılmıştır. Yaşlandırılmış katkı maddeli numunelere yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı geri dönüşüm katkı maddelerinin yenileyici etkileri incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş asfaltın yaşlandırma karşıtı özellikleri ve RA-A ve yaşlanmış asfalt arasındaki uyumluluk incelenmiştir. Deneyler sonucunda, RA-A’nın üç tip asfaltında performansını etkili bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yaşlanmış 50 A asfaltı için RA-A ‘nın yenileyici etkilerinin diğer iki geri dönüşüm katkı maddesinden daha iyi olduğu görülmüştür. RA-A katkısı katılarak geri dönüştürülmüş asfaltın yaşlanma karşıtı özelliklerinin diğer iki geri dönüşüm katkısıyla elde edilen geri dönüştürülmüş asfalttan daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Jia vd. [67] tarafından yapılan çalışmada, atık makine yağı kalıntıları içeren asfalt çimentosuna FT-IR analizi ve DSR deneyi yapılarak asfalt çimentosunun kızılötesi

spektrumları ve reolojik özellikleri incelenmiştir. PG64-22 ve PG76-22 olan bağlayıcılara asfalt ağırlığının %2,5, %5, %7,5, %10 oranlarında katkı katılarak modifiye asfalt bağlayıcı numuneleri elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, %5'in üzerinde makine yağının asfalt bağlayıcının kızılötesi spektrumlarını ve reolojik özelliklerini önemli bir şekilde değiştirdiği görülmüştür.

Yang vd. [68] tarafından yapılan çalışmada, asfalt bağlayıcıya kendi ağırlığının %5 ve %10 oranında atık odun kaynaklarından elde edilen biyo-yag karıştırıldıktan sonra katılan biyo-yagların asfalt karışım performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Orijinal biyo-yag (OB), suyu alınmış biyo-yag (DWB) ve polimer modifiyeli biyo-yag olmak üzere üç tip biyo-yag kullanılmıştır. Asfalt kaplama analizör testi, dört nokta kırıy yorulma testi, dinamik modül testi, dolaylı çekme dayanım testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, eklenen biyo-yagın asfalt karışımının yorulma performansını önemli bir şekilde iyileştirdiği, çekme dayanımını çok az etkilediği ve tekerlek izi performansı ve dinamik modül üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Polimer modifiyeli asfalt karışımının diğer iki karışımdan daha iyi performans gösterdiği gibi, biyo-yagli polimerlerin asfalt karışımının performansını artırdığı gözlenmiştir.

Chen vd. [10] tarafından yapılan çalışmada, fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikler bakımından atık yemeklik bitkisel yağların yaşlanmış asfalt bağlayıcıların yenilenmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. AO (60/80), BO (40/60) ve CO (40/60 - SBS modifiyeli) üç farklı tipte orijinal asfalta RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak yaşlanmış asfaltlar elde edilmiştir. Bu yaşlanmış asfaltlara, asfalt ağırlığının %3-7 oranlarında atık yemeklik bitkisel yağ ilave edilmiştir. Elde edilen yenilenmiş asfaltın kimyasal, fiziksel ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, atık yemeklik bitkisel yağın katılmasıyla yaşlanmış asfaltın etkili bir şekilde yumuşadığı görülmüştür. Atık bitkisel yağ optimum miktarda kullanıldığında yaşlanmış asfaltların reolojik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, atık yemeklik bitkisel yağ içeren yaşlanmış asfaltın yaşlanma direnci, tekerlek izi direnci, elastik geri dönme performansının iyileştiği görülmüştür. Katkı eklendiğinde, yaşlanmış asfaltın asfaltten içeriği ve karbonil ve sülfoksit yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Buna rağmen, düşük sıcaklıktaki esneklik, elastiklik ve termostabilite bakımından katkılı yaşlanmış asfaltın özellikle de SBS modifiyeli asfalt bağlayıcının daha da geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Feng-Su vd. [9] tarafından, atık pişirme yağı içeren mikrokapsüllerin (MicroWCOs) kullanımı hakkında yeni bir yaklaşım ihtimalinin araştırılması üzerine bir çalışma

yapılmıştır. MicroWCOs üretilirken kabuk malzemesi olarak metanol melamin formaldehit pre-polimeri kullanılmıştır. Emülsiyon hızı ve çekirdek/ kabuk oranları tarafından morfolojik özellikler, boyut, kabuk kalınlığı ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, MicroWCOs'lerin erimiş bitüm içerisinde termal stabiliteye sahip olduğu ve tekrarlanan sıcaklık değişimleri boyunca canlı kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca atık pişirme yağının yaşlanmış bitüme kolayca nüfuz edebildiği ve penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite gibi özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Aziz vd. [69] tarafından, esnek kaplamalar için alternatif bağlayıcı olarak kullanılması olası malzemeler hakkında bir literatür çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, biyo-yag, polimerler, plastikler, kauçuk ve atık pişirme yağı gibi biyo-kökenli kaynaklardan elde edilen malzemeler incelenmiştir. Çalışma sonucunda, biyo kökenli yakıtların talebinin hem sürdürülebilirlik bakımından, hem de güvenli enerji ve pozitif bir ekonomik fırsat sağlaması bakımından popülerlik kazanmakta olduğu ifade edilmiştir. Polimerler, kauçuk ve plastiklerin kaplamanın kalitesini artırmak ve bitüm oranını azaltmak için büyük bir fırsat sunduğu belirtilmiştir. Atık pişirme yağının ise yaşlanmış bitümü gençleştiren bir katkı maddesi olarak kullanımı başarılı bir uygulama olarak ifade edilmiştir. Böyle bir uygulamanın çevre dostu ve ekonomik bir çözüm olduğu belirtilmiştir.

Lei vd. [8] tarafından yapılan çalışmada, asfaltın düşük sıcaklıklardaki performansını geliştirmek için bio kökenli ve rafineri atık yağlar içeren farklı tip yağlar kullanılmıştır. Yağların asfaltın düşük sıcaklıktaki performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için BBR testi, Basit Kenarlı Dişli Kiriş (SENB) testi, Modülasyonlu Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (MDSC) testi yapıldı. Sonuç olarak yağlar asfaltın düşük sıcaklıktaki performansını geliştirmişti. Ek olarak modiyeli asfalt karışımına Numunede Ölçülü Termal Gerilme Testi (TSRST) uygulandı ve sonuç olarak modifiyeli asfalt karışımının kırılma sıcaklığının saf asfalt karışımından daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Maharaj ve Maharaj [70] tarafından, atık düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polivinilklorid (PVC) ve kullanılmış makine yağının (UEO) Trinidad Gölü asfaltı (TLA) için bir performans artırıcı olarak uygulanabilirliği incelenmiştir. Bu atık polimerik malzemeler asfalta belirli oranlarda katılarak elde edilen modifiye asfaltın belirli fiziksel özellikleri ve asfaltın yorulma çatlaklarına karşı direnci ve tekerlek izine karşı direnci performans özellikleri belirlenmiştir. LDPE, PVC, UEO katkıları asfalta, asfalt ağırlığının sırasıyla %1-3, %1-10, %0-30 oranlarında katılmıştır. Sonuç olarak, kullanılmış makine

yağının asfalttaki konsantrasyonunun artmasıyla, yorulma çatlaklarına karşı dirençte azalma ve tekerlek izine karşı dirençte ise artış görülmüştür. Tekerlek izine karşı direnç ve yorulma çatlaklarına karşı direnç için PVC katkısının sırasıyla %2 ve %8 oranlarında katılmasının en uygun oranlar olduğu tespit edilmiştir. %1 LDPE katılarak elde edilen modifiyeli asfaltın yorulma çatlaklarına ve tekerlek izine karşı direnci arttığı görülmüştür.

Yang ve You [71] tarafından yapılan çalışmada, DSR ve MSCR (Multiple-Stress Creep Recovery) deneyleri kullanılarak biyo-yağ modifiyeli asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki performansı değerlendirilmiştir. Atık keresteden elde edilen işlenmemiş biyo-yağ (UTB), işlenmiş biyo-yağ (TB) ve polimer modifiyeli biyo-yağ katkı maddeleri saf asfalta, asfalt ağırlığının %5 ve %10 oranlarında katılmıştır. DSR ve MSCR deneyleri sonucunda, katılan biyo-yağ yüzdesinin artmasıyla asfaltın yüksek sıcaklık performansının iyileştiği görülmüştür. Bu üç tip biyo-yağ kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, MSCR ve DSR deney sonuçlarında çok az farklılık olduğu ortaya konmuştur.

Maharaj vd. [72] tarafından, atık pişirme yağının(WCO) Trinidad Gölü asfaltı (TLA), Trinidad petrol bitümü (TPB) ve TLA:TPB (50:50) karışımının reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu üç tip asfalta, asfalt ağırlığının %0, %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında WCO katkısı katılmıştır. Bu üç tip asfalta WCO eklendiğinde G^* (sertlik) azaldığından dolayı malzemenin yumuşadığı gözlenmiştir. Ayrıca TLA asfaltlı bağlayıcıya WCO eklendiğinde elastikiyet özelliğinde kademeli bir şekilde azalış gözlenmiştir. %6 WCO eklenmesiyle minimum elastikiyet gözlenmiştir. Buna ek olarak, TPB için %8 ve TLA:TPB (50:50) temel karışım için %2 oranında WCO katıldığında maksimum elastikiyet gözlenmiştir.

Garcia vd. [73] tarafından asfalt kaplamalarda canlandırıcı olarak kapsüllü ayçiçek yağlarının kullanılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, 5 farklı çapta kapsül yapılmıştır ve bu kapsüllerin mekanik dayanımı ve yapısı karakterize edilmiştir. Sonrasında bu kapsüller asfalt karışım ile karıştırılmıştır ve karıştırma ve sıkıştırmaya karşı dirençleri incelenmiştir. Asfalt karışımı test numunelerinin yorulma ömrü, esneklik modülü, dolaylı çekme dayanımında kapsüllerin etkisi ölçülmüştür. Sonuç olarak, daha büyük kapsüllerin küçük kapsüllere göre daha fazla yağ içerdiği ve daha az güçlü olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, kapsüllerin çoğunun karıştırma ve sıkıştırma işlemlerine dayanıklı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kapsüllerin gerekenden daha düşük güce sahip olmalarından dolayı bu kapsüllerle elde edilen asfalt karışımının esneklik modülü ve dolaylı çekme

dayanımını azalttığı görülmüştür. Kapsüllerin asfalt karışımın yorulma ömrünü etkilemediği ortaya konmuştur.

Guarin vd. [74] tarafından, biyo-yag modifiyeli bitümün yol yapımında kullanımı hakkında geniş bir laboratuvar araştırması yapılmıştır. İzlanda'da ki biyo-yag modifiyeli sathi kaplamalı pek çok yolun bitüm kusması, bağlayıcının boşa gitmesi ve sathi kaplamanın tekerleklere yapışması gibi ciddi sıkıntılar ortaya koyduğu belirtilmiştir. Bu kusurların sebeplerine belirlemek için 6 yol bölümünden alınan örnekler laboratuvarda değerlendirilmiştir. Biyo-yagli (kolza tohumu yağı ve balık yağı) ve biyo-yagsız bağlayıcıların reolojik ve kimyasal yapısı incelenmiştir. Bağlayıcının reolojik özelliklerini belirlemek için penetrasyon, RV, DSR, RTFOT, PAV, BBR deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, 6 yol bölmesinden alınan örnekler değerlendirildiğinde her iki yağında bitümle çözünürlük sorunu gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca yağlar agregaya yüzeyini kapladığı için agregaya ile bitüm arasındaki yapışmayı engellediği belirtilmiştir. Geleneksel reolojik testler sonucunda basit bir karşılaştırma yapmanın zor olduğu belirtilmiştir. Modifiye bağlayıcıların superpave standartlarından daha fazla kütle kayıpları olmasına rağmen bu bağlayıcıların yaşlandırmadan öncesinde ve sonrasındaki reolojik özelliklerini koruduğu belirtilmiştir. Kimyasal analizler sonucunda ise balık yağının kolza yağından biraz daha iyi işe yaradığı belirtilmiştir.

Lei vd. [75] tarafından yapılan çalışmada, yağ modifiyeli bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki özellikleri ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) arasındaki ilişki incelenmiştir. Modifiyer olarak biyo-kökenli ve rafineri atık yağlardan oluşan 9 farklı yağ kullanılmıştır. Modifiye edilmiş asfaltın reolojik ve kırılma özelliklerini değerlendirmek için BBR, MDSC ve SENB testi yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda asfaltın sertliği ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) arasında iyi bir lineer ilişki olduğunu, fakat BBR ile belirlenen gevşeme parametresi (m value) iyi bir korelasyona sahip olmadığını belirtmiştir. Ayrıca asfaltın kırılma özellikleri ve camsı geçiş sıcaklığı arasında çok güçlü bir korelasyon olduğu belirtilmiştir.

Zabelkin vd. [76] tarafından yapılan çalışmada, ağaç piroliz yağlarının suda çözünmeyen fraksiyonları ve kompozit bir bağlayıcı olan bitümün özellikleri araştırılmıştır. Orijinal bitüme, bitüm ağırlığının %0, %0,5, %1, %5, %10, %15, %100 oranında katkı maddesi katılmıştır ve modifiye asfalt betonu üretilmiştir. Kompozit bağlayıcının ve modifiye asfalt betonunun özellikleri incelenmiştir. Saf ve katkılı bitüme penetrasyon, yumuşama noktası, gerilme testi ve frass kırılma noktası testi uygulanmıştır.

En iyi performans %10-15 oranında katkının bağlayıcıya katılmasıyla sağlandığı görülmüştür. En iyi yapışma kuvveti değeri %10-20 oranında katkının bağlayıcıya katılmasıyla sağlanmıştır. Kompozit bağlayıcıdaki katkı oranının %50 yi aşması ile asfalt betonunun su emmesi çok az miktar azaltmıştır. Yani katılan katkı miktarının %50'yi aşması sonucunda asfalt betonunun suya karşı direnci artmıştır.

Sun vd. [77] tarafından yapılan çalışmada, pişmiş atık yağlardan elde edilen biyo-yagın katılmasıyla modifiye edilen asfalt bağlayıcının özellikleri araştırılmıştır. Saf bitüme (40/60) 125 °C sıcaklıkta, 40 dk, 5000 rpm de bitümün ağırlığının %0, %2, %4, %6, %8 oranlarında katkı maddesi eklenmiştir. Katkı maddesinin kimyasal analizi için FT-IR testi ve bileşenlere ayırma testi yapılmıştır. Biyo-yag modifiyeli asfalt bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, ayrılma eğilimi testi, DSR ve BBR testleri uygulanmıştır. Bileşenlere ayırma testi sonuçları biyo-yagı oluşturan başlıca bileşenlerin aromatikler, reçineler, doymuş yağlar olduğunu ortaya koymuştur. FT-IR analizleri sonucunda biyo-yag ve orijinal asfalt arasında hemen hemen hiç kimyasal reaksiyon gerçekleşmediği görülmüştür. Biyo- yağ katkısının orijinal asfaltın düktilitesini ve penetrasyonunu artırırken, yumuşama noktası ve vizkozitesini azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca bu katkının saf bitüme katılmasıyla saf bitümün deformasyon direncini ve elastik geri dönme performansını azaltırken, gerilme- gevşeme özelliğini ve termal çatlaklara karşı direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Gong vd. [78] tarafından, biyo-yag ile gençleştirilmiş asfaltın fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Biyo-yag, atık pişirme yağından üretilen biyodizelin kalıntısından elde edilmiştir. 50 penetrasyonlu saf asfalt ve SBS modifiyeli asfalt kullanılmıştır. Yaşlandırılmış asfalta, asfalt ağırlığının %0-3 arasında değişen oranlarında katkı katılmıştır. Biyo-yagın optimum içerik miktarına karar vermek için geleneksel deneyler yapılmıştır. Saf, yaşlandırılmış ve gençleştirilmiş asfalta RV, DSR, BBR deneyleri yapılarak asfaltın reolojik özellikleri belirlenmiş ve asfalt fraksiyon bileşenleri, fonksiyonel gruplar ve asfaltın mikroyapısı mikro test teknikleri yardımıyla analiz edilmiştir. Son olarak, mikro mekanik deneyler yardımıyla nem hassasiyeti değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, biyo yağ asfaltı yumuşatmıştır ve düşük sıcaklıktaki çatlama direncini artırmıştır. Viskozite azaldığından dolayı işlenebilirlik artmıştır. Biyo yağ katılan yaşlanmış asfaltın fiziksel özelliklerinde iyileşme görülmüştür. Gençleştirilmiş asfaltın nem önleme performansı için daha fazla araştırma yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Bor ve bor türevi katkıların bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığı zaman;

Lentz [79] tarafından, bitümlü malzemeden oluşan ürünlerin kohezyon ve adezyon özelliğini iyileştirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bitüme 177 °C sıcaklıkta bitüm ağırlığının %0,25- %3 arasında değişen oranlarda borik asit ilave edilerek penetrasyon ve yumuşama noktası ilişkisi gözlenmiştir. Sonuç olarak, az miktarda borik asidin ilave edilmesiyle bitümlü malzemelerin yumuşama noktası ve penetrasyon ilişkisinin büyük ölçüde iyileştiği gözlenmiştir. Ayrıca, borik asitin katkı maddesi olarak kullanılması ile malzemenin aşınmaya karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir.

Doyle vd. [80] tarafından, bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıklarda agrega ile karışımı sırasında oluşan düktilite kayıplarını azaltmak ve kaplamadaki çatlak oluşumuna karşı direnci artırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında agrega ile bitümü karıştırma işlemi yapmadan önce bitüme bor içerikli kimyasal katkılar ilave edilmiştir. Deneyler sonucunda, katkı maddesinin katılmasıyla düktilite kayıplarının azalacağı tespit edilmiştir.

Marzocchi vd. [81] tarafından, güçlendirilmiş bitümlü malzemeler elde etmek amacıyla bitüme cam elyafı katılarak modifiye edilmiştir. Yüksek ölçüde su sevme özelliğinden dolayı cam fiber bitümle fiziksel ya da kimyasal bağ yapamamıştır. Cam fiber parçacıklarının organik metal bileşimlerinden bir ortoesterle kimyasal reaksiyona girmesiyle sentezlenen boratlı reaksiyon ürünü bitüm modifikasyonunda kullanılarak bu bağ elde edilmiştir.

Arslan vd. [82] tarafından, organik kökenli kalsiyum ve borik asit katkılarıyla modifiye edilen bitümün performansının değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Laboratuvar ortamında sentezlenen bu katkıları 50/70 penetrasyonlu bitüme bitüm ağırlığının %1, %2, %3, %5 ve %10 oranlarında katılarak modifiye bitümler elde edilmiştir. Modifiye numunelere düktilite, yumuşama noktası, Nicholsan soyulma testi, Marshall stabilite testi, BBR, DSR ve RV deneyleri uygulanmıştır. Dönel viskozite sonuçlarına göre her bir katkının optimum içeriği %3 olarak tespit edilmiştir. Her iki katkı, bitümün yumuşama noktası ve viskozitesini azaltırken, düktilitesini artırmıştır. DSR deney sonuçları incelendiğinde, bitümün yüksek sıcaklık performansında değişiklik olmadığı görülmüştür. Her iki katkı da, bitümlü karışımların Marshall stabilitesini, soyulma direncini, sertlik modülünü geliştirmiştir.

Oruç vd. [83] tarafından, 50/70 penetrasyonlu bitüme bitüm ağırlığının %1, %3, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında borik asit (BA), aromatik hidrokarbon (AH) ve (BA+AH) birlikte katılarak bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Modifikasyon işlemi 150°C sıcaklıkta, 15 dakika süreyle, 800 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modifiye bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite deneyi uygulanmıştır. Sonuç olarak, bitümün fiziksel özelliklerindeki en büyük iyileşmenin %3 BA+ %1 AH ile modifiye edilmiş bitüm karışımının sonuçlarından elde edildiği kaydedilmiştir.

Terzi vd. [84] tarafından, kolemanit atığının filler olarak kullanılmasıyla bitümlü bağlayıcı karışımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Bitümlü karışım numunelerinin elde edilmesi için aynı agrega gradasyonuna sahip numunelere kireçtaşı filleri eklenmiştir. Marshall stabilite testi yapılarak modifiye bitümlü karışımların optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Belirlenmiş olan optimum değere göre 5 farklı oranda kolemanit filleri karışıma katılmıştır ve Marshall stabilite testi yardımıyla modifiye numunelerin optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, kolemanit atığının kireçtaşına yakın sonuçlar verdiği, şartname belirtilen aralıklarda kaldığı ve kireç taşının yerine alternatif bir filler malzemesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Arslan vd. [85] tarafından, monoetilen ve dietilen glikol kökenli sentetik poliboron bileşiklerinin bitümlü karışımlarda oluşan çatlama ve tekerlek izinin engellenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu katkıları 50/70 penetrasyonlu bitüme ayrı ayrı olmak üzere bitüm ağırlığının %1, %2, %3, %5 oranlarında ilave edilmiştir. Modifiye bitümlerin elde edilmesi işlemi, 1300 rpm karıştırma hızında, 110°C sıcaklıkta ve 5 dk sürede gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, modifiye edilen bitüm numunelerine yumuşama noktası, DSR, BBR, RV, Marshall stabilite, Nicholson soyulma testleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, monoetilen kökenli sentetik poliboron katkılı bitümün yumuşama noktası değerinde çok az miktarda azalma görülmesine rağmen, dietilen glikol kökenli sentetik poliboron katkılı bitümün yumuşama noktası değerinde artış gözlenmiştir. Her iki katkıında bitümlü karışımın stabilitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Monoetilen glikol kökenli sentetik poliboron katkısının bitümün düşük sıcaklık çatlama direncini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, dietilen glikol kökenli sentetik poliboron katkılı bitümün tekerlek izine karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir.

Selman [86] tarafından, bor atığı olan tinkalin öğütülmesi ile elde edilen filler malzemenin bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Karışıma ağırlıkça %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında elde edilen filler malzeme ilave edilerek bitümlü sıcak karışım numuneleri (BSK) üretilmiştir. Elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla karışıma ağırlıkça %6 oranında kireçtaşı katkılı mineral filler katılarak bitümlü sıcak karışım numuneleri (BSK) üretilmiştir. Bitüme geleneksel deneyler, karışıma ise Mekanik Marshall Batırma Deneyi, Marshall Stabilite ve Akma deneyi, Donma –Çözülme çevriminden sonra Marshall stabilite ve akma deneyi, Dolaylı Çekme- Rijitlik Modülü Deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, bor atıklarının filler malzeme olarak bitümlü sıcak karışım kaplamaların aşınma tabakalarında kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Oruç vd. [87] tarafından, laboratuvar ortamında kimsayal olarak elde edilen bor içerikli dört adet katkı maddesi 50/70 penetrasyonlu bitüme, bitüm ağırlığının %1'i oranında ilave edilerek modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Modifiye edilmiş numuneler 800 rpm karıştırma hızıyla, 150°C sıcaklıkta 15 dakika karıştırılarak elde edilmiştir. Modifiye edilen numunelere düktilite, yumuşama noktası, penetrasyon, DSR ve RV deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen katkı maddelerinin bitümün reolojik ve fiziksel özelliklerini geliştirdiği ve tekerlek izine karşı direncini arttırdığı ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, en fazla iyileşmenin sülfirik asit katalizörlüğünde sentezlenen bor içerikli katkı maddesi ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Oruç ve Yılmaz [88] tarafından yapılan çalışmada, bitümün performans özelliklerini geliştirmek için boron içerikli yeni bir katkı maddesi (siklik borat ester, CBE) geliştirilmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüme bitüm ağırlığının %1, %2, %4 ve %6 oranlarında katkı maddesi eklenerek modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, frass kırılma noktası, DSR, RV, BBR, RTFOT ve PAV deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, CBE katkısı kullanılarak bitümlü bağlayıcının sertliği, viskozitesi, yumuşama noktası ve tekerlek izine karşı direnci artarken sıcaklık hassasiyetinin azaldığı gözlenmiştir. CBE katkısı birde bağlayıcının kompleks kayma modülünü, yaşlanmaya karşı direncini ve düşük sıcaklık çatlama direncini artırırken, faz açısını azaltmıştır.

Yılmaz [16] tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında, laboratuvar ortamında yeni bir bor içerikli organik katkı maddesi sentezlenmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüme bitüm

ağırlığının %1, %2, %4 ve %6 oranlarında elde edilen katkı ilave edilerek 150°C 'de, 1000 rpm karıştırma hızında, 15 dakika süre ile modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen katkı maddesinin ve elde edilen modifiye bitüm numunelerinin yapısal özelliklerini belirlemek için FT-IR, SEM, TG/DTG analizleri yapılmıştır. Ayrıca elde edilen numunelere geleneksel bağlayıcı ve karışım deneylerinin yanısıra superpave deneyleri de uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, katkının saf bitümün tekerlek izini, kıvamını, adezyon ve esneklik özelliğini, yaşlanma direncini, yük yayma kabiliyetini ve yorulma direncini arttırdığı, sıcaklık hassasiyetini ve düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azalttığı ortaya konmuştur. Bu etkilerin en fazla gözlendiği katkı yüzdesi ise %6 olarak belirlenmiştir.

Gürü vd. [89] tarafından yapılan çalışmada, ham şekerin işlenmesi sırasında elde edilen organik atık malzeme olan şeker pancarı melası ile şeker pancarı melası ve bor oksitin laboratuvar ortamında uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen sentetik bir malzeme olan borik asit kökenli melas katkıları (MBOC) bitüme katılmıştır. 50/70 penetrasyonlu bitüme her iki katkı maddesi bitüm ağırlığının %1-%10'u aralığından ayrı ayrı eklenmiştir. RV, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, DSR, Marshall stabilite ve Nicholson soyulma testleri yapılarak modifikasyon işleminin bitümün ve bitümlü karışımların özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Marshall stabilite ve Nicholsan soyulma testleri sonucuna göre, MBOC katkısı katılmasıyla bitümlü karışım performansı artarken, şeker pancarı melası katılmasının bitümlü karışım performansı üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. %10 içerikli MBOC katkısının bitümün yorulma çatlağı ve tekerlek izine karşı direncini artırmıştır. Buna rağmen, %5 oranında şeker pancarı melası katkısı bitümün yorulma çatlağına karşı direnci artırırken, tekerlek izine karşı direnci azaltmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bu tez çalışmasında, aspir yağı ve borik asit içerikli maliyeti düşük yeni bir katkı maddesinin sentezlenmesi, elde edilen katkı maddesinin bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve bitümlü bağlayıcıların modifiyesinde kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bunun yanısıra, bu çalışmadan elde edilecek sonuçların, bu alanda yapılacak diğer çalışmalara katkı da bulunması amaçlanmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür çalışmasında, kaplamaların ömrünü ve performansını geliştirmek için polimer kökenli katkıları, bitkisel atık yağlar ve bor kökenli katkıların bitüm modifikasyonunda kullanıldığı görülmüştür. Ülkemiz için önemli bir maden olan bor pek çok alanda kullanılmasına rağmen literatürde bor ürünlerinin bitümlü bağlayıcı modifikasyonunda katkı maddesi olarak kullanılmasına ilişkin az sayıda çalışma vardır. Ülkemizde hızla üretimi yaygınlaşan aspir bitkisi, kumaş boyasından biyodizel üretimine kadar pek çok alanda kullanılmasına rağmen literatürde bitüm modifikasyonunda kullanılması ile ilgili çalışma olmadığı görülmüştür.

Bazı yağ asiti ve yüksek moleküllü hidrokarbon türevlerine adapte edilen bor bileşikleri, bu ürünlere ısıl stabilite, mekaniksel direnç, esneklik, yangın geciktirici, anti-bakteriyel, anti-fungal, oksidatif direnç gibi özellikler kazandırmaktadır [16, 90-95]. Aspir yağının ise bitümün özellikleri üzerindeki etkileri bilinmemektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, bitkisel yağların bitümün düşük sıcaklık performansını olumlu etkilediği, yaşlanmış bitümü gençleştirici özelliğine sahip olduğu, bitümü yumuşatarak düşük sıcaklıktaki çatlama direncini artırdığı görülmüştür. [8, 60, 75, 78]. Aspir yağında bir bitkisel yağ olduğundan dolayı bitüm modifikasyonunda tek başına kullanıldığında yüksek sıcaklıkta bitümü yumuşatacağı öngörülmüştür. Bu nedenle, yüksek miktarda doymamış yağ asiti içeren aspir yağına yağ asitleri ile adapte olabilen borik asitin sülfirik asit katalizörlüğünde katılmasıyla yeni bir katkı maddesi elde edilip bitüme belli oranlarda katılmıştır. Böylece modifiye bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri test edilerek belirlenmiştir.

Laboratuvar ortamında kimyasal bir şekilde sentezlenen aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesinin yapısal analizi Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ile yapılmıştır.

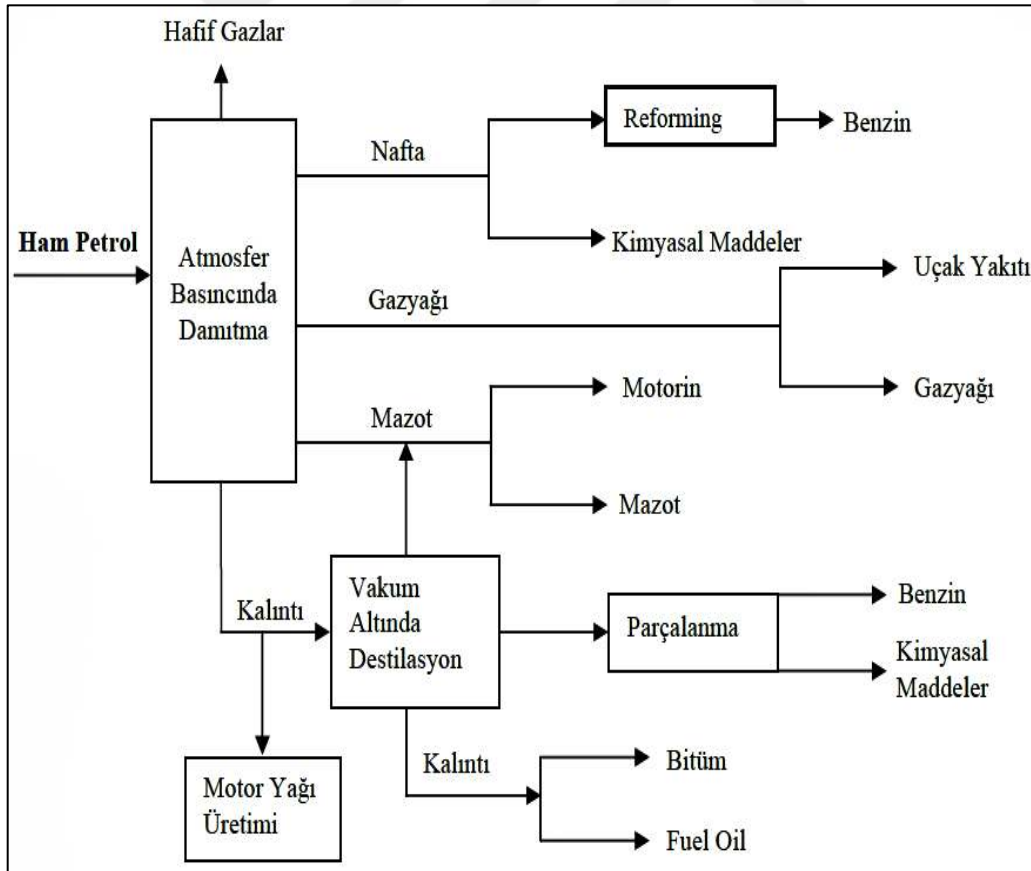
Başarıyla sentezlenen katkı maddesi saf bitümlü bağlayıcıya bitüm ağırlığının %0,3, %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında katılmıştır. Bitüm ve katkı maddesi, 30 dakika, 1000rpm hızda, 150°C sıcaklıkta mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir.

Üretilen modifiye bağlayıcıların yapısal analizi FT-IR ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile belirlenirken; sıcaklık hassasiyeti, yumuşama noktası ve kıvamlılığı geleneksel bağlayıcı deneyleri ile tekerlek izi direnci ve yorulma çatlaklarına karşı direnci DSR, yüksek sıcaklıkta işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirlik özellikleri RV, yaşlanma özelliklerine olan etkileri RTFOT deneyi ile ortaya konulmuştur.

1.4. Bitüm

Bitüm; doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunların gaz, sıvı, yarı-katı veya katı olabilen, metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır [96, 97].

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Asfaltlarda doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Doğal asfaltlar, mineral maddeler ile karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasından elde edilir. Katran ise başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir [98]. Ham petrolden bitüm üretiminin şematik gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur.

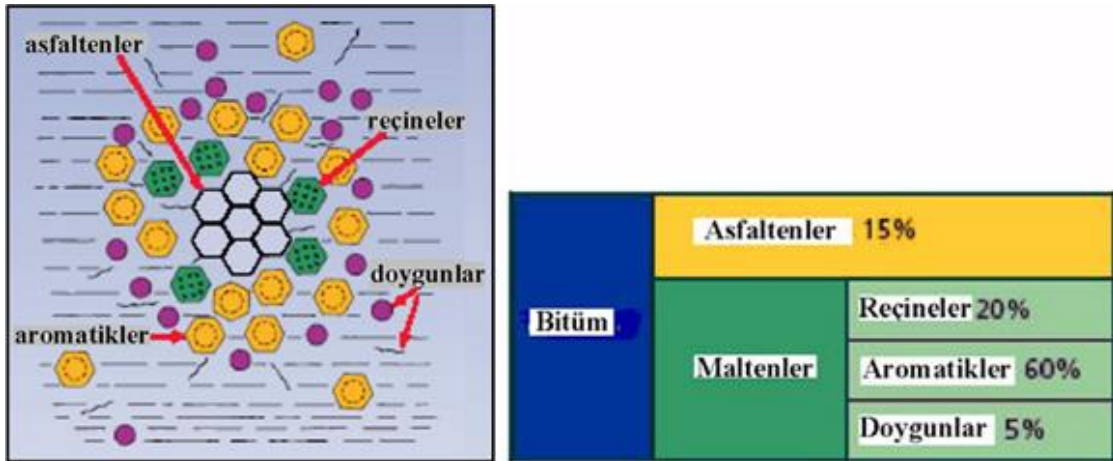


Şekil 1. Ham petrolden bitüm elde edilme adımları [16].

1.4.1. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitüm, hidrokarbon molekülleri (karbon ve hidrojen) ile yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve nitrojen, sülfür ve oksijen atomları içeren fonksiyonel grupların kompleks bir kimyasal karışımıdır. Aynı zamanda bitüm, inorganik tuzlar, oksitler ya da porfirin yapıları şeklinde meydana gelen nikel, demir, magnezyum, kalsiyum ve vanadyum gibi metaller de bünyesinde bulundurulur. Farklı ham petrol rollerden üretilen bitümlerin element analizi sonuçları genel olarak; karbon (%82-88), hidrojen (%8-11), sülfür (%0-6), oksijen (%0-1,5) ve nitrojen (%0-1) elementlerini içermektedir [98, 99].

Kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olan bitümün n-heptan'da çözünen kısmına, maltenler, çözünmeyen kısmına asfaltenler adı verilir. Maltenler kendi içinde aromatikler, reçineler ve doygunlar olmak üzere alt guruplara ayrılır [98]. Asfaltenler, karbon ve hidrojenden oluşan, n-heptan içerisinde çözünmeyen kahverengi ya da siyah amorf katılar olup bitümün %5 ile %25'ini oluştururlar. Asfalten miktarının artırılması sonucu, daha yüksek viskoziteli ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip bitüm elde edilmektedir. Reçineler, n-heptan içerisinde çözünen, asfaltenler gibi büyük oranda hidrojen ve karbondan oluşan ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot içeren maddeler olup, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katılardır. Aromatikler, bitümün %40 ile %60'ını oluşturan, asfaltenlerin yayılımı için gerekli ortamı sağlayan, koyu kahve renkli viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Doygunlar ise parafinli ve parafinsiz bileşenlerden oluşan, ortalama molekül ağırlığı aromatlara benzeyen ve bitümün %5 ile %20'sini oluşturan viskoz yağlardır [96, 98, 99]. Bitümün kimyasal yapısı ve bileşenleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Bitümün kimyasal yapısı ve bileşenleri [16, 100]

1.4.2. Bitümün Reolojisi

Reoloji, bir maddenin deformasyon ve akmasının sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresini göz önünde bulundurarak belirlemeye çalışan bir bilim dalı olarak ifade edilebilir [101, 102]. Bitümün reolojisi, belirli bir sıcaklıkta malzemedeki baskın hidrokarbon moleküllerinin hem fiziksel yapısı hem de kimyasal bileşimi ile belirlenmektedir. Yapı ve bileşimde ve ya her ikisinde meydana gelecek değişiklikler reolojide bir değişiklik oluşması sonucunu doğuracaktır [33, 103]. Bitüm, reolojik olarak karmaşık bir yapıya sahip olup yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak viskozdan elastığe kadar değişik davranış gösterebilmektedir [104]. Ayrıca, bitüm termoplastik bir malzeme olup bu özelliğinden dolayı sıcaklık değişimlerine karşı da duyarlıdır. Buna bağlı olarak bitümün davranışı, üzerine uygulanan yüke, yükün uygulanma süresine ve bitümün bu esnadaki sıcaklığına bağlıdır. Sıcak karışıma bitüm katıldığında bitümün tüm özellikleri sıcak karışıma geçer ve sıcak karışımlar viskoelastik ve termoplastik malzemelerdir. Yaz aylarındaki sıcak havalarda ya da yavaş bir şekilde hareket eden ağır taşıtların altında bitümlü kaplamalar, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı viskoz sıvılar gibi davranır ve akarlar. Eğer akmaya karşı direnç çok düşük ise, kaplama tabakasında ağır yük ve yüksek ısıdan kaynaklanan tekerlek izi oluşabilir. Düşük sıcaklıklarda ise termoplastik özellikleri sebebiyle bitümlü kaplamalar, çok sert veya kırılğan hale gelebilir ve kaplamada çatlaklara sebep olabilir [41, 101].

1.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Günümüzde, bitümlü bağlayıcıların özelliklerini belirlemek için Karayolu teknik şartnamesinde belirtilen geleneksel deneylerin yanısıra bu özelliklerin asfalt kaplamasının performansı üzerindeki etkilerini tespit edebilmek için yüksek performanslı asfalt kaplama (superpave) şartnamesinde belirtilen performansa dayalı bağlayıcı deneyleri uygulanmaktadır. Bu deneyler aşağıda belirtilmiştir;

Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler

- Yumuşama noktası deneyi
- Penetrasyon deneyi
- Düktilite deneyi

- Force düktilite deneyi
- Özgöl ağırlık deneyi
- Frass kırılma noktası deneyi
- Parlama noktası deneyi
- Çözünürlük deneyi
- İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT)

Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri

- Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR)
- Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR)
- Dönel viskozite deneyi (RV)
- Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)
- Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV)

1.5.1. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler

1.5.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi ile bitümün kıvamı ya da sertliği ölçülür. Penetrasyon anlam olarak batma ya da içe girme olarak ifade edilir. Penetrasyon deneyi, 100 gr ağırlığındaki standart bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüme batma miktarı olarak tanımlanmaktadır [105]. Penetrasyon değeri kıvamlilikle ters orantılı olup, penetrasyon değeri arttıkça deneye tabi tutulan bitümlü bağlayıcı daha yumuşak bir kıvama sahip olur [33, 106, 107].

1.5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, bitümün sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmek için uygulanan bir deney yöntemidir. Bu deneyde standart halkalar içerisine konulan bitüm numunesi üzerine 3,5 gr ağırlığındaki bilyeler yerleştirilir ve numuneler su banyosu içerisinde 5°C/dk hızla ısıtılır. Bilyelerin halkaları tutan kalıbın tabanına değdiği andaki sıcaklık değeri yumuşama noktası değeri olarak kaydedilir [108].

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa olan hassasiyetleri penetrasyon ve yumuşama noktası deneyinden elden edilen değerler yardımıyla hesaplanan Penetrasyon İndeksi (PI) ile tespit edilmektedir ve aşağıdaki formülasyon [98] ile hesaplanmaktadır.

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

YN bitümün yumuşama noktası değerini, Pen25 ise bitümün 25°C 'deki penetrasyon değerini ifade etmektedir. Penetrasyon İndeksi yüksek bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara ve düşük ısı çatlaklarına karşı direnci daha yüksektir [16, 28, 45,109].

1.5.1.3. Düktilite Deneyi

Kelime anlamıyla düktilite, çekebilme ya da uzama olarak ifade edilebilmektedir. Düktilite değeri daha düşük olan bitümlü bağlayıcılarla karşılaştırıldığında, uzama yeteneği fazla olan bitümlü bağlayıcılar daha yüksek bir bağlama yeteneğine sahiptirler. Bunun yanı sıra, düktilite değeri çok yüksek olan bitümlerin ısı değişimlerine karşı duyarlılığı çok fazladır. Bitümlü bağlayıcı numunelerinin düktilite değerini belirlemek için, standart bir kalıba bitümlü bağlayıcı numunesinden dökülür. Numune düktilite cihazına yerleştirilir. Düktilite cihazındaki suyun sıcaklığı 25°C± 0,5 olmalıdır. Bitümlü bağlayıcı numunesi bu sıcaklıkta 5±0,25 cm/dakika hızla çekilir. Numune bir miktar uzadıktan sonra kopar. Kopma anındaki uzama miktarının cm cinsinden değeri düktilite değeri olarak kaydedilir [107, 110].

1.5.1.4. Force Düktilite Deneyi

Force düktilite deneyi ile polimerle modifiye edilmiş bazı bitümlü bağlayıcıların çekme özellikleri belirlenebilmektedir. Force düktilite deneyi, çekme kalıbına yerleştirilen bitüm numunesinin düktilite cihazı içinde 5°C±0,5 sıcaklıkta, 5±0,25 cm/dakika ve 400 mm uzama değerine kadar uzatılması prensibine dayanmaktadır [111].

1.5.1.5. Özgöl Ağırlık Deneyi

Bitümlü malzemenin özgöl ağırlığı 25 °C sıcaklıktaki, hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır. Genellikle piknometre yöntemi ile özgöl ağırlık belirlenir [16, 97].

Özgöl ağırlık deneyi yapılırken piknometre, terazi ve su banyosu kullanılmaktadır. Deneye başlangıcında piknometre analitik terazide tartılarak elde edilen sonuç kaydedilir. Sonrasında piknometre, 25 °C sıcaklıkta su ile doldurulur ve kapağı iyice kapatılır. Su dolu piknometre tekrar tartılır ve sonucu kaydedilir. Bitüm numuneleri yeterli akışkanlık elde edilene kadar ısıtılır. Piknometre yaklaşık olarak yarısına kadar bitüm numunesi ile doldurulur. Daha sonra içinde numune bulunan piknometre oda sıcaklığına kadar soğutulur ve kapağı ile birlikte tartılır. Piknometrenin içindeki bitüm numunesinin üzeri damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı iyice kapatılır. Daha sonrasında piknometre 25±0.5 °C sıcaklıktaki su banyosuna tamamen batırılır. 30 dakika su banyosunda bekletildikten sonra piknometre alınır ve dışı iyice kurulanıp tartılır [16, 97]. Aşağıda verilen formülasyonla özgöl ağırlık hesabı yapılır.

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)}$$

a = Boş piknometre ağırlığı, gr

b = Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

c = Yarısına kadar bitümle doldurulan piknometre ağırlığı, gr

d = Saf su, bitüm ve piknometre ağırlığı, gr

1.5.1.6. Frass Kırılma Noktası Deneyi

Frass kırılma noktası deneyi bitümlerin düşük sıcaklıklardaki davranışlarının yani çatlamaya başladığı andaki sıcaklık değerini belirleyen bir yöntemdir. Bu deneyde, 0,5 mm kalınlığında, bitümle kaplanmış 41 mm x 20 mm boyutlarındaki bir çelik plaka yavaş bir şekilde bükülmekte ve serbest bırakılmaktadır. Plakanın sıcaklığı, bitüm kritik sertlik değerine ulaşmış çatlamaya başlayıncaya kadar dakikada 1°C düşürülür. Bitüm numunesinin çatlamaya başladığı andaki sıcaklık “kırılma noktası” olarak adlandırılır [112, 113].

1.5.1.7. Parlama Noktası Deneyi

Parlama noktası, bir maddenin buharının alev temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklıktır. Bir malzemenin parlama noktasının bilinmesi, o malzemenin uygulanması sırasında ısıtılırken meydana gelebilecek herhangi bir tutuşma ve yangın tehlikesinin önlenmesi bakımından çok önemlidir.

Bu deneyde, bitümlü malzeme uygun bir akıcılığa ulaşana kadar (150-170°C) ısıtıldıktan sonra, kap yüzeyinde hava kabarcıkları kalmayacak şekilde kabın düzey çizgisine kadar doldurulur. Deney başlangıcında uygulanan sıcaklık hızı, parlama noktasına ulaşmaya kadar dakikada 14-17 °C olmalıdır. Parlama noktasına 28 °C sıcaklığa yaklaşıldığı andan itibaren başlayarak ısıtma hızı dakikada ortalama 5,5 °C olacak şekilde ayarlanır ve bu sıcaklıktan başlayarak termometrenin her 3 °C yükselişinin ardından deney alevciği bitüm numunesinin üzerinden bir kez geçirilir. Deney alevciğinin çapı 4mm olmalıdır. Numune yüzünün herhangi bir noktasında, parlama görüldüğü anda termometreden okunan sıcaklık parlama noktası olarak kaydedilir [107].

1.5.1.8. Çözünürlük Deneyi

Bu deney, içerisinde mineral madde bulunmayan ve ya çok az bulunan bağlayıcıların organik çözücüler içerisinde çözünürlüğünü belirlemek için yapılır. Bu organik çözücüler, benzen, trikloretilen ve karbon sülfür gibi çözücülerdir. Bitümlü bağlayıcıların trikloretilende en az %99 oranında çözünmesi gerekir [113, 114, 115].

1.5.1.9. İnce Film Halinde Isıtma Deneyi

İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT) plentte bitümle agreganın karıştırılması sırasındaki bitümlü bağlayıcılarda ortaya çıkan yaşlanmayı temsil eder. TFOT deneyinde 14 cm çapa sahip düz bir kaba 50 ml bitüm dökülerek 3,2 mm kalınlığa sahip bir film tabakası elde edilir. Numune kapları 163°C'deki etüve yerleştirilerek 5 saat boyunca bekletilir. Bu süre zarfında numune kapları etüv içerisinde düşey eksen etrafında 5 devir/dakika hızla döndürülür. Deney süresi tamamlandığında etüvden çıkarılan numuneler tartılır ve deney sonrası numunelerde ortaya çıkan kütle kayıpları belirlenir [116, 117].

1.5.2. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Superpave Deneyleri

Kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı, kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklık çatlaklarını azaltarak bağlayıcının performansını en üst seviyeye çıkarmak ve ölçmek için superpave deneylerinden yararlanılmaktadır [7, 118]. Superpave bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgede maruz kalacağı sıcaklıklarda uygulanarak bitümlü bağlayıcının saha performansı ile doğrudan ilgili reolojik ve fiziksel özelliklerinin analitik deneylerle belirlenmesidir. Tablo 1’de Superpave yönteminde yer alan bağlayıcı deneyleri ve bu deneylerin kullanım hedefleri ifade edilmektedir [7, 119, 120, 121, 122].

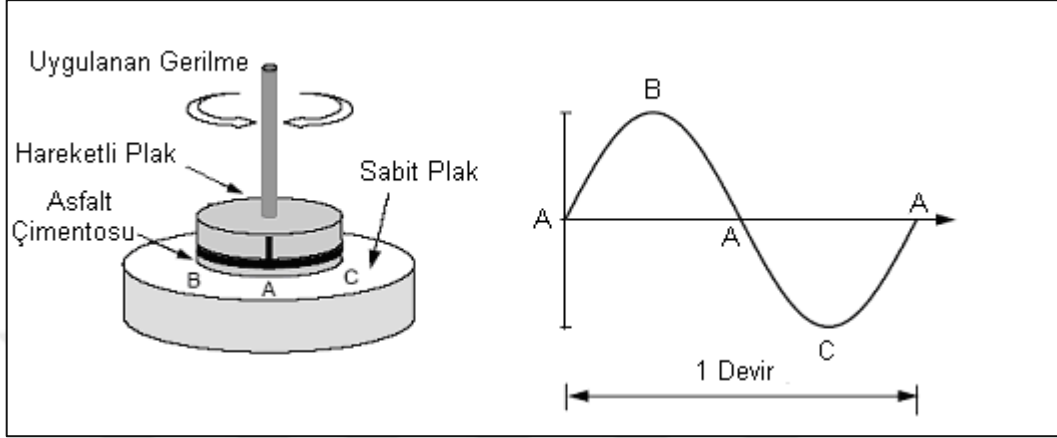
Tablo 1. Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım hedefleri, performans parametreleri

Deney Adı	Kullanım Hedefleri	Performans Parametreleri
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bitümlü bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıktaki performans özelliklerinin belirlenmesi	Kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı direnci
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT)	Bitümlü bağlayıcının kısa süreli yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi	Yapım süresi boyunca yaşlanma direnci
Basıncı Yaşlandırma Kabı (PAV)	Bitümlü bağlayıcının uzun süreli yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi	Hizmet ömrü boyunca yaşlanma direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki performan özelliklerinin belirlenmesi	Pompalama, aktarma
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıktaki performans özelliklerinin belirlenmesi	Termal çatlak direnci

1.5.2.1. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (DSR)

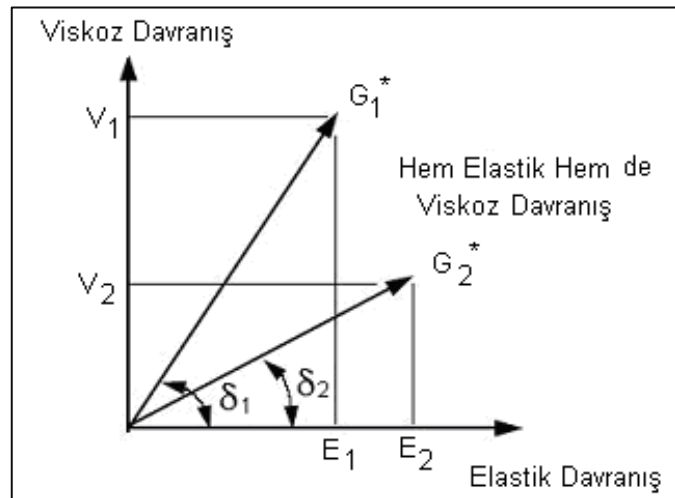
Bitümlü bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıklarda yorulma çatlaklarına ve tekerlek izine karşı dirençlerini belirlemek için DSR deneyi kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izine karşı direncini tespit etmek için yaşlandırılmamış ve RTFOT deneyiyle kısa süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların yorulma özelliklerini belirlemek için ise PAV deneyiyle uzun süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Şekil 3’de gösterildiği gibi DSR deneyinde bitümlü bağlayıcı numunesi birbirine paralel iki plaka arasına yerleştirilir. Altındaki plaka sabit kalırken, üstteki plaka deney sürecinde hareket etmektedir. Üstteki plaka A noktasından B’ye, B

noktasından A'ya, A noktasından C'ye ve C noktasından tekrar A'ya hareket etmektedir. Deney boyunca bu salınım devam eder. Deney yapım aşamasındaki dönme frekansı ortalama 1,59 devir/sn olarak ifade edilebilir [16, 102, 120, 123, 124].



Şekil 3. DSR deneyi deformasyon yönleri

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının faz açısını (δ) ve kompleks kayma modülünü (G^*) tespit ederek elastik ve viskoz davranış özelliklerini ortaya koymaktadır. G^* tekrarlayan kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının ortaya koyduğu toplam direncin simgesidir. Bitümlü bağlayıcının sahip olduğu yükleme ve ısı hızı bağlayıcının δ ve G^* değerlerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Şekil 4'te bitümlü bağlayıcının viskoelastik özelliği grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik özelliği

Tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri belirlenmesi için DSR deneyi sonucunda tespit edilen G^* ve δ değerleri kullanılmaktadır. $G^*/\sin\delta$ değeri bitümlü bağlayıcının tekerlek izi direnç parametresi olarak adlandırılmaktadır. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin\delta$ değeri işlem görmemiş bağlayıcılar için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için en az 2,20 kPa olmalıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcının performans seviyesi PG X-Y olarak belirtilir. X ifadesi, bağlayıcının özelliklerini yitirmeden hizmet verdiği en yüksek sıcaklık, Y ise en düşük sıcaklığı ifade etmektedir. DSR deneyi sonucunda $G^*/\sin\delta$ değerinin sağlaması gereken en küçük değeri ortaya koyan en yüksek sıcaklık değeri, bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesini temsil etmektedir [16, 87, 102-125].

1.5.2.2. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (BBR)

Soğuk iklimli yerlerde uygulanan esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan fakat çevre ve iklim koşullarından kaynaklanan ve bunun yanı sıra termal çatlak olarak da adlandırılan düşük sıcaklık çatlaklarının gözlenmesi için kiriş eğme reometresi geliştirilmiştir [7, 16, 120, 126].

BBR testi ile belli sıcaklıkta sabit yük altındaki bitümün sünme ya da defleksiyon özellikleri belirlenir. Sıcaklığın azalmasıyla kaplamanın maruz kaldığı termal gerilmeler yükleme olarak adlandırılır [123, 127]. Dikdörtgen kesitli kiriş şeklindeki numuneye tam orta noktasından 980 ± 5 mN'lik sabit bir tekil kuvvet 4 dakika boyunca uygulanır.

BBR testinde 4 dakikalık deney süresi boyunca yükleme sebebiyle numunenin orta noktasında meydana gelen defleksiyon ölçülür ve yazılım ile 8., 15., 30., 60., 120. ve 240. saniyelerdeki sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m) otomatik olarak hesaplanır. PG bağlayıcı şartnamesine göre S maksimum 300 MPa ve 60. saniyedeki m minimum 0,3 olmalıdır [123, 128, 129].

Numunenin sünme yüklerine karşı gösterdiği dirence sünme rijitliği (S) denir ve aşağıda verilen formülasyon yardımıyla bulunur [123, 127, 130].

$$S(t) = \frac{PL^3}{4hb^3\delta(t)}$$

$S(t)$ = t anındaki sünme rijitliği (MPa)

P = Deneyde uygulanan sabit yük (980 ± 5 mN)

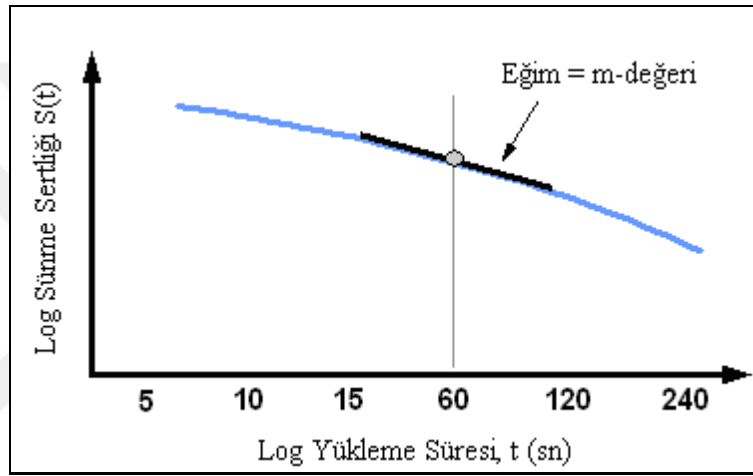
L = Mesnetler arası mesafe (102 mm)

$\delta(t)$ = t anındaki defleksiyon (mm)

b = Numune genişliği (12,5 mm)

h = Numune yüksekliği (6,25mm)

Sünme oranı (m), numuneye ait sünme rijitliğinin zamana göre değişimini olarak ifade edilir. Bu oran sünme rijitliği- zaman grafiğinin herhangi bir noktasındaki teğetin eğimi yardımıyla bulunur (Şekil 5)



Şekil 5. Sünme oranı (m) değerinin elde edilmesi [16]

1.5.2.3. Dönel Viskozite Deneyi (RV)

Bitümlü bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne ölçüde işlenebilirlik ve pompalanabilirlik özelliğine sahip olduğunu belirlemek için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde dönel viskozite deneyi kullanılmaktadır. Bu deneyin yapılması için AASHTO TP48 standartına uygun olarak tasarlanmış Brookfield Viskozimetresi kullanılmaktadır.

Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma anında yeterli akışkanlığa sahip olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, RV deneyi yaşlandırılmamış orijinal ve modifiye edilmiş bitüm numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir [120, 122, 131, 132].

Şekil 6.6’da görüldüğü üzere dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta bitümlü bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile tespit edilmektedir [122, 131]. Silindirik mil 20 rpm hızla döndürülürken viskozite değeri otomatik olarak tespit edilmektedir.

Ayrıca bu deney sonucunda elde edilen viskozite değerleri yardımıyla sıcaklık viskozite grafiği çizilir. Bu grafik yardımıyla karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmektedir. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları sırasıyla 170 ± 20 ve 280 ± 30 cP viskozite değerindeki sıcaklıklar olarak hesaplanmaktadır. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir [120, 131, 133].

1.5.2.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Bitümlü bağlayıcıların ısıtılması sonucunda uçucu madde kaybının tespit edilebilmesi için RTFOT deneyi kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, bu deneyle havanın ve sıcaklığın etkisiyle bitümlü bağlayıcıların fiziksel özelliklerindeki değişimi belirlemek için gerekli yaşlandırılmış numuneler elde edilmektedir [116].

TS EN 12607-1’de belirtildiği gibi RTFOT deneyi, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 şişe kullanılarak yapılmaktadır. Her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici aracılığıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 ml/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, 1,25 mm kalınlığında ince bir film tabakası oluşturacak şekilde şişeleri tam olarak kaplar ve böylece yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılır. Deney süresi sonlandığında elde edilen 8 şişe numunenin 2 şişesi kütle kaybını belirlemek için kullanılırken, geri kalan altı şişe ise bitümün yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Deney sonrasında kütle kaybı aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır. M_1 numunenin yaşlanmadan önceki kütlesi, M_2 numunenin yaşlandıktan sonraki kütlesi olarak ifade edilmektedir [116, 117].

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

1.5.2.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV)

Kaplamanın hizmet ömrü boyunca bağlayıcılarda ortaya çıkan uzun dönemli sertleşme özelliklerini tespit etmek için PAV (basınçlı yaşlandırma kabı) deneyi kullanılmaktadır. RTFOT deneyinden elde edilen numuneler üzerinde PAV deneyi uygulanmaktadır. Her bir numune kabına 50 gr RTFOT deneyinden elde edilen numune yerleştirilir. Bitümlü bağlayıcı numuneler 20 saat boyunca yüksek ısı ve yüksek basınç altında tutularak uzun dönemde maruz kalacağı sertleşme etkisi oluşturulur. Deney süresi boyunca numunelere 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır. PAV deneyi bağlayıcı sınıfına göre 90, 100 ve 110°C 'de uygulanmaktadır [99, 120]. Bitümlü bağlayıcı performans sınıflarına göre belirlenen sıcaklık aralıkları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcı performans sınıfı ve PAV deney sıcaklık aralıkları [120]

Bağlayıcı Performans Sınıfları	PAV deney sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110

1.6. Bitümün Modifiye Edilmesi

Esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım-onarım maliyeti ve gereksinimin daha az olması istenmektedir. Esnek kaplamalar kendilerinden beklenen fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için;

- Kalıcı deformasyon
- Yorulma çatlakları
- Düşük ısı çatlakları
- Su etkisiyle asfalt soyulması ve düşük durabilite

gibi başlıca kusurların en aza indirgenmesi gerekir. Bu nedenle hala kullanılmakta olan geleneksel bitümlü bağlayıcıların özelliklerini modifiye ederek gerek asfalt bağlayıcının gerekse karışımın performansı arttırılmaya çalışılmaktadır. Modifikasyon işlemi bağlayıcının ve/veya karışımın performansını arttırmak amacıyla modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü bağlayıcı karışım içerisine katılarak yapılır. Bu şekilde elde edilen bitümlü bağlayıcıya “Modifiye bitüm (MB)” ve karışıma ise “Modifiye Edilmiş Karışım” denir [99].

Genel olarak bitümlü bağlayıcıların modifiye edilme nedenleri aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir [134]:

- Bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- Kaplamanın tabakasının uzun süreli ekonomik olmasını sağlamak,
- Düşük kalitedeki agrega tanelerini kullanılır hale getirebilmek,
- Terlemeyi ya da kusmayı azaltmak,
- Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
- Kaymaya karşı direnci yüksek olan kaplama yüzeyleri elde etmek,
- İnce bir kaplama tabakası elde edilmesini mümkün kılmak,
- Bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki adezyon kuvvetini arttırarak soyulmayı önlemek,
- Düşük sıcaklıklarda daha esnek kaplamalar elde edilerek oluşabilecek çatlakları engellemek,
- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit kaplamalar elde edilerek tekerlek izini azaltmak.

1.6.1.Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri

Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesi amacıyla birçok katkı maddesi kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri Tablo 3’te gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 3. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin sınıflandırılması [33, 96, 135, 136]

Katkı Tipi	Katkı Maddesi		Katkı Maddesinin Bitümlü Bağlayıcı Kıvamına Etkileri
Filler	- Mineral Filler - Taş tozu, Kireç, Portland Çimentosu, Uçucu kül - Sülfür - Karbon Siyahı		Sertleştirme
Extender	- Sülfür - Lignin (Odun özü)		Sertleştirme
Elastomerler (Polimerler Grubu)	- Doğal Kauçuk - Yapay Kauçuk - Stiren butadien (SBR) - Stiren butadien stiren (SBS) - Dönüştürülmüş Kauçuk - SEBS - EPDM		Elastikiyet, Sertleştirme
Termoplastikler (Polimerler Grubu)	- Polietilen - Polipropilen - Etilen Vinil Asetat (EVA) - Polvinil Klorür (PVC) - Asetaller - Akrilikler - Floroplastikler	- Polisülfid - Polikarbonat - Polifenilen eter - Polistiren - Poliimidler - Polisülfon - Poliüretan - Poliamidler	Sertleştirme
Termoset	- Alkitler - Epoksiler - Kazein - Aminoplastlar - Fenolikler	- Alil - Dialilftalat - Melamin - Poliester	Sertleştirme
Reaktifler Terpolimerler	Elvoley RET		Kalıcı Sertleştirme, Elastikiyet
Fiber	- Doğal Fiber - Asbest - Taşıyünü	- 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

Literatür taraması sonucunda bazı katkı maddelerinin yaygın olarak bitüm modifikasyonunda kullanıldığı görülmektedir. Bu katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkileri Tablo 4’te sunulmuştur. Ayrıca, yaygın kullanılan bitümlü bağlayıcı katkılarının bozulma etkileri ise Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4. Yaygın kullanılan bazı katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkisi [96]

Katkı Maddesi	Katkı Maddelerinin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi
Solvent	Viskozite
Filler tozu	Yoğunluk, viskozite, maliyet, mekanik sağlamlık, yumuşama noktası
Stiren-Butadien- Stiren (SBS)	Elastik geri dönme, düşük sıcaklık hassasiyeti, yumuşama noktası, penetrasyon
Balmumu	Bağlayıcılık, adezyon, viskozite (sıcak), sertlik (soğuk)
Emülsifikasyon	Islatma kabiliyeti, viskozite, uygulama sıcaklığı
Islatma Katkıları	Adezyon, ıslatma kabiliyeti
Yağ	Bağlayıcılık, bitümün yapısı, viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası
Fiberler	Tiksotropik, viskozite, çatlak direnci
Ataktik- Polipropilen (APP) Etilen- Vinil- Asetat (EVA)	Sertlik, penetrasyon, yumuşama noktası, frass kırılma noktası

Tablo 5. Yaygın kullanılan bitümlü bağlayıcı katkılarının bozulmalara etkileri [16]

Katkı Sınıfı	Katkı Tipi	Bozulmalara Karşı Etkileri				
		Yorulma Çatlağı	Kalıcı Deformasyon	Düşük Isı Çatlağı	Yaşlanma	Nem Hasarı
Polimerler-Plastomerler	Etilen- Vinil- Asetat (EVA)	✓	✓			
	Etilen- Akrilat (EA)		✓			
	Poliisobütilen		✓			
	Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen		✓	✓		
	Polipropilen	✓	✓			
	Etilen-Propilen-Dien-Monomer (EPDM)		✓			
Ufalanmış Kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler, işlemler	✓	✓	✓		
Soyulma önleyiciler	Poliamidler					✓
	Poliaminler					✓
	Organo-metalikler					✓
	Aminler: Amidoaminler					✓
Antioksidanlar	Siyah karbon		✓		✓	
	Fenoller				✓	
	Aminler				✓	✓
	Kalsiyum tuzlar				✓	
	Karbamatlar: Kurşun			✓	✓	
	Çinko			✓	✓	
Fiberler	Polyester		✓			
	Fiberglas					
	Çelik	✓	✓	✓		
	Doğal: Selüloz		✓			
	Mineral		✓			
	Güçlendiriciler	✓	✓	✓		
	Polipropilen	✓	✓	✓		
Fillerler	Siyah karbon		✓		✓	
	Mineral: Sönmüş Kireç		✓		✓	✓
	Uçucu Kül		✓			
	Portland Çimentosu		✓			
	Kiremit Tozu		✓			
Hidrokarbonlar	Aromatikler			✓		
	Parafmiks/mum			✓		
	Shale oil				✓	✓
	Doğal asfaltlar: Trinidad	✓	✓	✓		✓
	Gilsonit		✓			✓
	Asfaltlenler: DEMEX asfaltlenler		✓			
	Asfaltlenler: Yüksek işlem reçineler		✓			
	SDA asfaltlenler		✓			
	Vakum gaz yağı			✓		
Genleştiriciler	Naftenik					
	Odun lignini					✓
Polimerler-Elastomerler	Sülfür	✓	✓	✓		
	Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	✓	✓	✓		
	Stiren-Butadien di blok (SB)		✓	✓		✓
	Stiren-Butadien-Rubber (SBR)		✓	✓		
	Polikropen lateks	✓	✓			
	Doğal kauçuk		✓			
Oksidanlar	Akrilonit-Butadien-Stiren (ABS)		✓			
	Manganez bileşikleri		✓			

Bitümlü bağlayıcıların modifiyesinde kullanılan katkı maddelerinde aşağıdaki özellikler aranmaktadır [96];

- Kolay bir şekilde temin edilebilmeli,
- Maliyeti uygun olmalı,
- Bitüm karışım sıcaklığında özelliğini yitirmemeli,
- Düşük sıcaklıklarda ise kaplamanın fazla kırılgan ya da sert olmasını önlemeli,
- Bitümün yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale gelmeden akışkanlığa karşı direncinin artmasını sağlamalı,
- Bitüm ile homojen bir şekilde karışabilmeli.

Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılardan beklenen özellikler ise şunlardır [96, 102];

- İşlenebilirlik özelliğine olmalı,
- Uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı tanelerini sarıp akışkanlığını sağlayabilmeli,
- Depolama, uygulama ve hizmet süresinde kimyasal ve fiziksel olarak stabil kalmalı,
- Depolama, uygulama ve hizmet süresinde sahip olduğu özelliklerini kaybetmemelidir.

1.7. Yağlar

Yağlar, yüksek moleküllü yağ asitlerinin üç değerli alkol olan gliserinle meydana getirdikleri esterler yani trigliseritlerdir. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesine ait resim Şekil 6'da verilmiştir. Yağlar, çok geniş ve karmaşık bir grup olan lipidlerin büyük bir kısmını oluştururlar. Yağın % 95- 99'unu trigliseridler, % 1-5'inide mono ve digliseridler, fosfatidler, serbest yağ asitleri, steroller, yağda çözünen vitaminler ve diğer maddeler oluştururlar [137, 138, 139].



Şekil 6. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi

1.8. Aspir Bitkisi ve Yağı

Aspir bitkisi sarı, beyaz, krem, kırmızı ve turuncu gibi değişik renklerde çiçeklere sahip, tohumları beyaz, kahverengi ve üzerinde koyu çizgiler bulunan beyaz taneler şeklinde olan ortalama 110-140 gün arasında yetişebilen kuraklığa dayanıklı bir yağ bitkisidir (Şekil 7). Kır safranı, papağan yemi, boyacı aspri, haspir gibi isimlerle de anılmaktadır. Benzerliği nedeniyle safran bitkisiyle sık sık karıştırılması sonucu yalancı safran olarak da adlandırılmaktadır [19].



Şekil 7. Aspir bitkisi

Aspir tohumlarında %20-45 oranında yağ bulunmaktadır. Aspirin dikenli ve dikensiz olmak üzere iki tipi bulunmaktadır. Dikenli formdaki aspirler dikensizlere göre daha fazla yağ içermektedir. Bitki kazık köklüdür ve kök toprak yapısına göre 100-150 cm derine inmektedir. Sap yuvarlaktır, 0,5-3,0 cm arası kalınlasmaktadır. Genellikle 80- 100 cm

arasında boylanabilen aspirin renkli çiçekleri gıda ve kumaş boyasında kullanılabileceği gibi, küspesi hayvan yemi olarak değerlendirilmektedir. Yağı sabun, boya, vernik, cila veya biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilmektedir. Aspirin kullanım alanları Tablo 6'da özetlenmektedir [17, 19, 140].

Tablo 6. Aspir bitkisinin kullanım alanları

Aspir Bitkisi	Ürün	Kullanım Alanları ve Yararları
Tohum	• Polidoymamış yağ içeren yenilebilir yağ • Yağ ekstraksiyonu sonucu elde edilen küspe • Yağ	Kolesterolün azaltılmasında etkili Hayvan Yemi Biyodizel üretimi, yemeklik yağ
Çiçek	• Gıda ve kozmetik boyası • Boya • İlaç	Sarıdan turuncuya kadar değişen renk eldesi Renklendirme Kardiovasküler hastalık, travma gibi hastalıkların tedavisi
Bitkinin Tamamı	• Seyreltici • Sap/Saman	Besleyici bitkisellerin hazırlanması Tahıl saplarının kullanımına benzer kullanım

Aspir yağında toplam doymamış yağ asitleri oranı çok yüksektir. Bu oran %90-93 civarındadır. Son yıllarda oleik asit ve linoleik asit oranı yüksek tipler üzerinde de çalışmalar hızlanmıştır. Oleik yağ asidi oranı %85 civarında olan çeşitler geliştirilmiştir [141, 142, 143]. Aspir bitkisine ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 7'de gösterilmektedir [144].

Tablo 7. Aspir yağına ait özellikler

Bitkisel Yağ	Isıl Değer KJ/Kg	Kinematik Viskozite mm ² /sn (40°C)	Yoğunluk (15°C)	Akma Noktası °C	Parlama Noktası °C	Bulutlanma Noktası	%C
Aspir Yağı	39772	28,33	0,9050	-14	226	-2	67,2242

Aspir, günümüzde özellikle Hindistan, ABD, Meksika, Kazakistan, Kırgızistan, Etiyopya ve Avusturalya gibi ülkelerde geniş alanlarda üretimi yapılan bir yağ bitkisi haline gelmiştir [19]. Aspir yağı, Türkiye'de ise karasal iklime sahip İç Anadolu Bölgesi ve bölge illerinden özellikle Şanlıurfa, Eskişehir, Konya ve Ankara'yı da içine alan 31 farklı ilde üretilmektedir. Türkiye'de aspir bitkisinin üretiminin yapıldığı bölgeler ve

şehirler Şekil 8’de gösterilmiştir [143, 145, 146, 147]. Türkiye’de yetiştirilen aspir türleri Tablo 8’de verilmiştir [148].



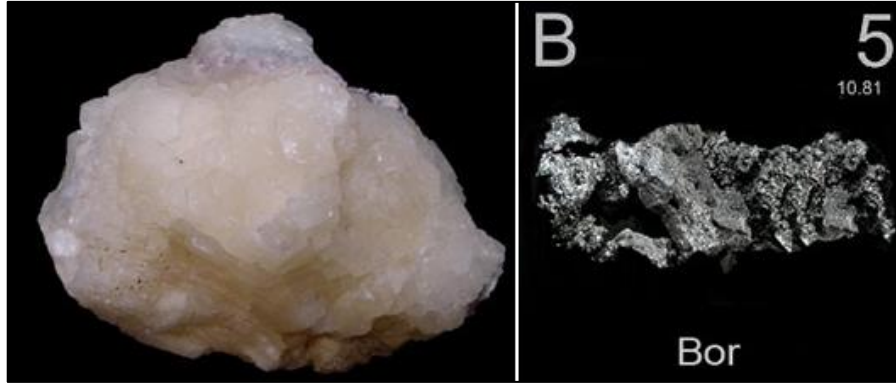
Şekil 8. Türkiye’de aspir bitkisinin üretiminin yapıldığı bölgeler ve şehirler

Tablo 8. Türkiye’de yetiştirilen aspir türleri ve özellikleri

Aspir Türleri	Dikenlilik	Çiçek Rengi	Bitki Boyu (cm)	Tane Rengi	Yağ Oranı (%)	1000 tane ağırlığı
Yenice	Dikensiz	Kırmızı	100-120	Beyaz	24-25	38-40
Diñçer	Dikensiz	Turuncu	90-110	Beyaz	25-28	45-49
Balcı	Dikenli	Sarı	55-70	Krem	38-40	40-48
Remzibey-05	Dikenli	Sarı	60-80	Beyaz	30-33	46-50

1.9. Bor

Bor, periyodik tabloda B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Şekil 9’da bor bileşeninin görünümü verilmiştir. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, bor bileşiklerinin birçok endüstride kullanılmasına imkan sağlamaktadır [149]. Bor bileşiklerinin en önemli kullanım alanları; temizlik ürünleri, tarım, metalürji, seramik, ahşap koruma, cam ürünleri, tekstil tipi fiberglass, yalıtım, enerji, cam elyafı, inşaat-çimento sektörü, nükleer uygulamaları olarak ifade edilebilir [150].



Şekil 9. Bor bileşeninin görünümü

Bor doğada tek başına element haline bulunmaz. Genellikle bir bileşiği olan boraks şeklinde bulunur. Tablo 9’da ticari alanlarda önemli bir yere sahip olan bor mineralleri ve bileşiklerine yer verilmiştir [16, 151-154].

Tablo 9. Ticari alanlarda önemli bir yeri bulunan bor mineralleri ve bileşikleri

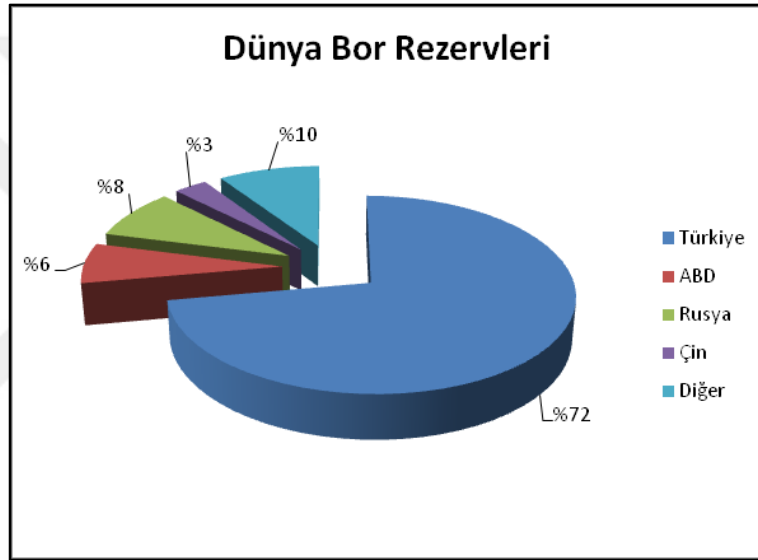
Mineral Adı	Kimyasal Formülü	B ₂ O ₃ içeriği, %
Sasolit	H ₃ BO ₃	56,3
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36,5
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51,0
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43,0
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50,8
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2
Bileşik Adı	Kimyasal Formülü	B ₂ O ₃ içeriği, %
Bor Oksit	B ₂ O ₃	100,00
Borik asit	H ₃ BO ₃	56,4
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,12
Sodyum Perborat Tetrahidrat	NaBO ₃ 4H ₂ O	23,45
Sodyum Perborat Monohidrat	NaBO ₃ H ₂ O	34,88
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

Dünyada bor yatakları, Kuzey Amerika (ABD), Güney Amerika (Arjantin, Şili, Peru, Bolivya), Asya (Rusya, Çin, Hindistan), Avrupa (Türkiye) ‘da bulunmaktadır. Dünya bor rezervleri Şekil 10’da gösterilmiştir. Bor madeni, ülkemizin en önemli doğal kaynaklarının başında gelmektedir ve dünyadaki bor yataklarının yaklaşık %72’si ülkemizde

bulunmaktadır. Türkiye’de bulunan bor rezervlerinin türleri ve yerleri Tablo 10’da ve Şekil 11’de sunulmuştur [155, 156].

Tablo 10. Türkiye’de bor rezervlerinin dağılımı (Mineral bazında-2015) [21]

Şehir/ İlçe	Maden Cinsi
Balıkesir/ Bigadiç	Kolemanit, Üleksit
Eskişehir/ Kırka	Tinkal
Kütahya/ Emet	Kolemanit, Üleksit
Bursa/ Kestelek	Kolemanit



Şekil 10. Dünya Bor Rezervleri



Şekil 11. Türkiye’de bor yataklarının bulunduğu şehirler

Yeryüzünde 230'dan fazla bor minerali mevcuttur [157]. Oksijenle bağ yapmaya meyilli olması sebebiyle birçok değişik bor- oksijen bileşimi bulunmaktadır. Bor oksijen bileşimleri borat olarak adlandırılır. Borik asit ise parlak, beyaz, altıgen pulcuklar halinde kristalleşen ve suda eriyen bir asittir (Şekil 12). Ergime derecesi 169°C, yoğunluğu ise 1,435 g/cm³'dür. Endüstride en fazla kullanılan bor ürünlerinden birisi borik asittir. Borik asit, boraks, kernit, üleksit, kolamanit, borasit ve boraks üreten göl sularından çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir [16, 158].



Şekil 12. Borik asit

1.10. Yapısal Analiz Metodları

Bu bölümde, sentezlenen aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesinin ve/ veya bu katkı maddesi ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların yapısal ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan SEM ve FT-IR analiz yöntemleri açıklanmıştır.

1.10.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topoğrafi ve kompozisyon

hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti hücresel tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur.

Sem görüntüsü ile 1 nanometreden daha yüksek çözünürlüğe ulaşılabilir. Standart SEM cihazları yüksek vakumda, kuru ve iletken yüzeyleri incelemek için uygundur. Fakat, düşüş vakumda, nemli koşullarda, çok düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara değişen koşullarda çalışabilen, çevresel tarama elektron mikroskobu gibi özelleşmiş cihazlarda vardır. SEM analizinin pek çok uygulama alanı vardır. Bunlardan biri de, elde edilen malzemenin yüzey özellikleri, korozyon dayanımları, kaplama kalınlığı, parçacık boyutu ve morfolojisi gibi özelliklerinin belirlenmesidir [159].

1.10.2. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) katı, sıvı ya da gaz numunelerden kızılötesi spektrumu elde edilen bir metottur. FT-IR spektrometre cihazları ile aynı anda geniş bir spektrum aralığında spektral veriler elde etmek mümkündür. Oldukça hızlı bir teknik olması sebebiyle pek çok avantaj sağlamasının yanısıra, organik malzemelerde olduğu gibi mineraloji uygulamalarında da büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, H ve C gibi hafif elementleri bünyesinde bulunduran minerallerin çalışılmasında, mineral yapı içerisindeki uçucu bileşenlerin konsantrasyonlarının tespit edilmesinde, doğal ve sentetik mineraller arasındaki izotopik değişimlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır [160].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Aspir yağı ve borik asitin kimyasal olarak karıştırılması sonucu sentezlenen katkı maddesi ile bitümün modifiye edilmesi ve bitümlü kaplamaların fiziksel ve mekanik performansının artırılması amacıyla yapılan bu çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan deneyler kapsamında izlenen yöntem aşağıdaki gibidir.

Kullanılan Malzemeler:

- B50/70 penetrasyonlu bitüm
- Aspir yağı ve borik asitin kimyasal olarak karıştırılması sonucu sentezlenen organik katkı maddesi

İzlenen Yöntem:

Bu çalışma kapsamında ilk olarak organik katkı maddesinin kimyasal sentezlenmesi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sentezlenen katkı maddesi bitüm ile modifiye edilmiş, katkı maddesinin ve modifiye bitümlerin yapısal analizlerinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için sentezlenen katkı maddesine ve modifiye bitümlere aşağıda ifade edilen deneyler uygulanmıştır.

1. Yapısal Özelliklerin Belirlenmesi İçin Uygulanan Deneyler:

- FT-IR
- SEM

2. Fiziksel ve Reolojik Özellikler İçin Uygulanan Deneyler:

- Penetrasyon
- Yumuşama Noktası
- Düktilite
- Force Düktilite
- DSR
- RV
- RTFOT

2.1. Bitümlü Bağlayıcı

Bu çalışmada kullanılan B50/70 penetrasyonlu bitüm Tüpraş İzmit Rafinerisinden temin edilmiştir. Temin edilen saf bitümün yapısal özelliklerini belirlemek için FT-IR ve SEM deneyi yapılırken, fiziksel ve reolojik özelliklerini belirlemek için geleneksel ve superpave deneyleri yapılmıştır.

2.2. Saf Bitüme Uygulanan Deneyler

2.2.1. Saf Bitümün Yapısal Analizi

- FT-IR Analizi

FT-IR cihazı yardımıyla bitümlü bağlayıcı numunelerinin yapısal analizi yapılmıştır. Az miktarda bitüm numunesi cihazın ölçüm yapılan kısmına yerleştirilmiştir ve oda şartlarında yapısal analiz ölçümleri yapılmıştır. Şekil 13’de FT-IR Spektrometre Cihazı gösterilmiştir.



Şekil 13. FT-IR spektrometresi cihazı

- SEM Analizi

SEM cihazı yardımıyla saf ve modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların morfolojik yapısı incelenmiştir. Modifiye edilmiş numuneler etüvde ısıtıldıktan sonra karbon bant üzerine 1-2 damla damlatılmıştır. Numunelerin bulunduğu karbon bantlar SEM cihazına

koyulmuştur ve 0,5 kV ve 250 büyütme oranında SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 14’de Sem cihazı ve karbon bant üzerindeki modifiye bitüm numuneleri verilmiştir.



Şekil 14. SEM cihazı (1) ve karbon bant üzerindeki bitüm numuneleri (2)

2.2.2. Geleneksel ve Superpave Deneyleri

2.2.2.1. Yumuşama Noktası Deneyinin Yapılışı

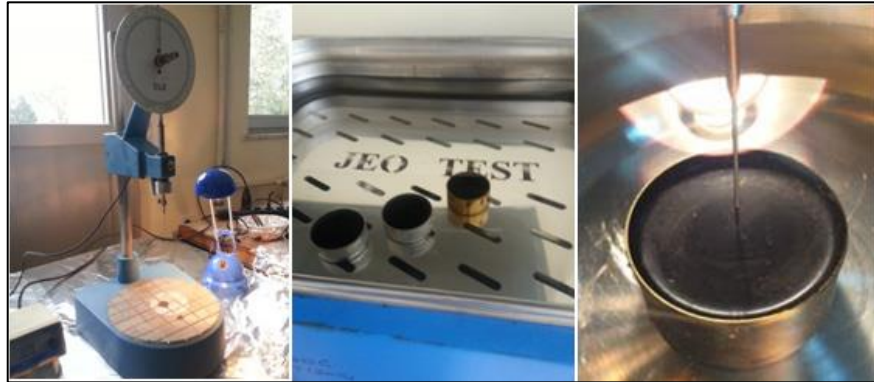
Bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini belirlemek ve akmaya başladığı sıcaklığı tespit etmek için yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Etüvde 150°C ‘de ısıtılan bitüm iki adet standart halkanın içine dökülmüştür ve üzerlerine 3,5gr ağırlığındaki bilyeler yerleştirilmiştir. Numuneler su banyosunun içerisine yerleştirilmiş ve su banyosu içindeki suyun ısısı dakikada 5°C (5 °C/dk) artacak şekilde ısıtılmıştır. Bilyelerin halkaları tutan kalıbın tabanına değdiği zamanki sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen iki sıcaklık değerinin ortalaması alınarak numunelerin yumuşama noktası değerleri belirlenmiştir. Şekil 15’de yumuşama noktası deney adımları gösterilmiştir.



Şekil 15. Yumuşama noktası deney adımları

2.2.2.2. Penetrasyon Deneyinin Yapılışı

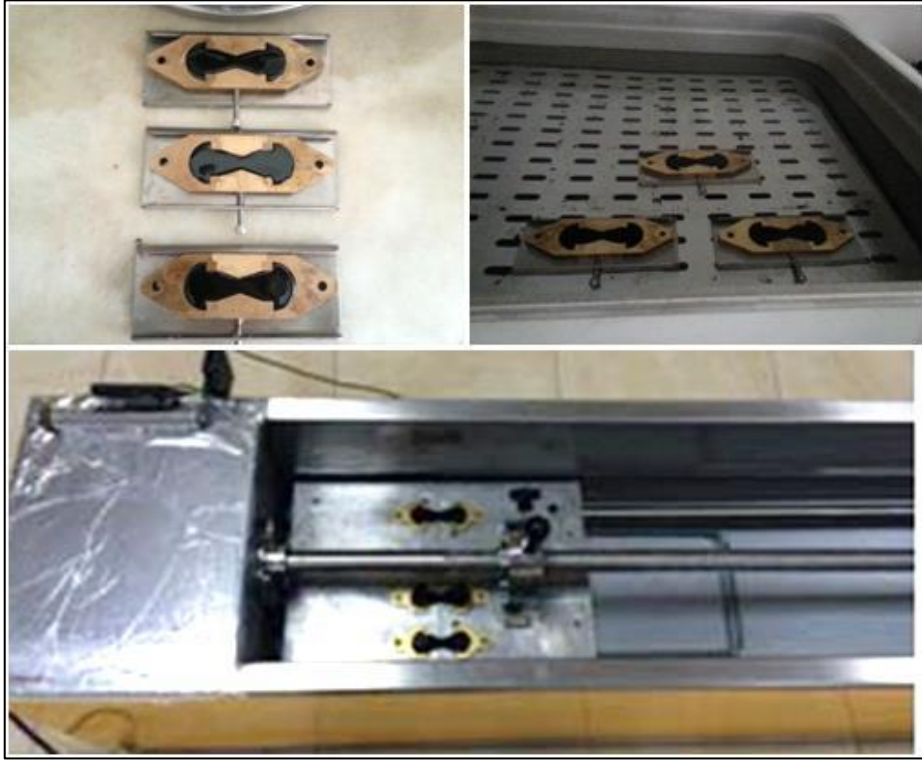
Saf bitümün sertlik ve ya kıvamınlılığını belirlemek için penetrasyon deneyi yapılmıştır. Kolayca dökülebilecek kıvama gelene kadar etüvde ısıtılan orijinal ve modifiye bitümler penetrasyon kaplarına dökülmüştür. Penetrasyon kaplarına dökülen numuneler oda sıcaklığında 1,5 saat bekletildikten sonra $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ sıcaklıktaki su banyosunda 1,5 saat bekletilmiştir. Su banyosundan alınan numune penetrasyon cihazına yerleştirilmiş ve 25°C sıcaklıkta, 100 gr yük altında standart iğne ucunun 5 sn süreyle numuneye batma miktarları ölçülmüştür. Bir numune için 3 ölçüm yapılmıştır ve bu ölçümlerin ortalaması o numunenin penetrasyon değeri olarak kaydedilmiştir. Şekil 16'da penetrasyon deney aleti ve deney yapılış adımları gösterilmektedir.



Şekil 16. Penetrasyon aleti ve deney yapılış adımları

2.2.2.3. Düktilite Deneyi Yapılışı

Bitümün uzama ve çekilebilme  zellikliğini belirlemek için düktilite deneyi yapılmıştır. Dökülebilecek kıvama kadar ısıtılan bitüm önceden vazelinle yağlanmış olan düktilite numune kalıplarına dökülmüş ve 30 dk oda sıcaklığında bekletilmiştir. Sonrasında 30 dk 25 C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilen numuneler banyodan çıkartılarak üzerleri ısıtılmış spatula ile düzeltildikten sonra tekrar 25 C sıcaklıktaki su banyosunda 1,5 saat bekletilmiştir. Numuneler su banyosundan alınarak düktilite cihazındaki yerlerine yerleştirilmiştir. Numune 5cm/dk hızla çekilmeye başlanmış ve numuneler kopana kadar bu işleme devam edilmiştir. Numuneler koptuğu anda cihazın kenarındaki cetvelden uzama miktarları cm cinsinden okunmuştur. Kopma değerleri okunan 3 numunenin ortalaması alınarak o numunenin düktilite değeri belirlenmiştir. şekil 17’de düktilite deneyinin yapıılış adımları gösterilmiştir.



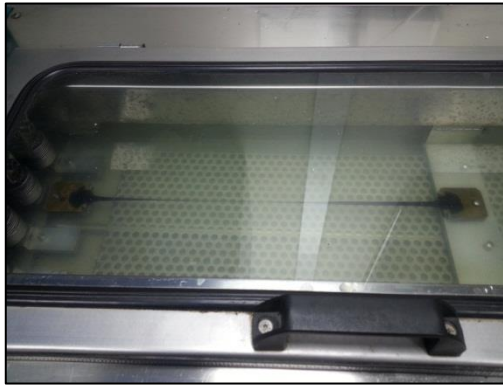
şekil 17. Düktilite deneyinin yapıılış adımları

2.2.2.4. Force Düktilite Deneyi Yapılışı

Bitümün düşük sıcaklıklardaki gerilme performansını ve çekme özelliklerini belirlemek için force düktilite deneyi yapılmıştır. Bu deney 5 °C, 10 °C olmak üzere 2 farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Dökülebilecek kıvama kadar ısıtılan bitüm önceden vazelinle yağlanmış olan force düktilite numune kalıplarına dökülmüş ve 30 dk oda sıcaklığında bekletilmiştir. Sonrasında 30 dk su banyosunda bekletilen numuneler banyodan çıkartılarak üzerleri ısıtılmış spatula ile düzeltildikten sonra tekrar su banyosunda 1,5 saat bekletilmiştir. Numuneler su banyosundan alınarak düktilite cihazındaki yerlerine yerleştirilmiştir. Düktilite cihazı içerisindeki numuneler 5 °C ve 10 °C ($\pm 0,5$) sıcaklıkta $50 \pm 2,5$ mm/dk ve 400 mm oranındaki bir uzama değerine kadar çekilmiştir. Bu iki sıcaklıkta her bir numune için ayrı ayrı yapılan deneyler tamamlandığında numuneye uygulanan yük (N) ve o yüke karşı gösterdiği direnç (J/cm^2) ve koptuğu andaki uzama miktarı(mm) değerleri belirlenmiştir. Force Düktilite deney numuneleri Şekil 18’de, deneyin yapılışı ise Şekil 19’da sunulmuştur.



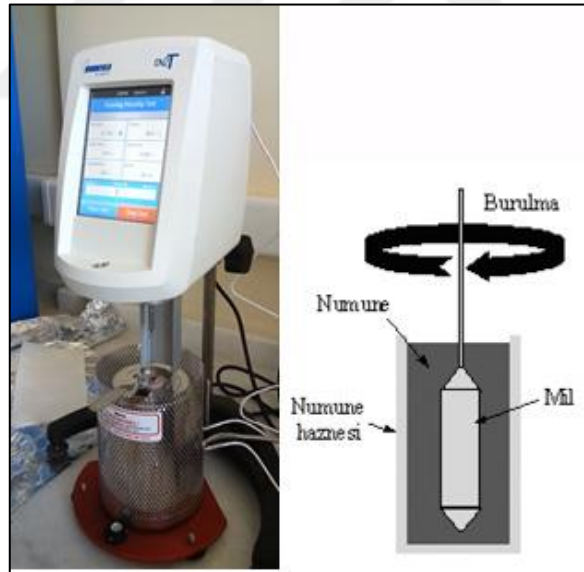
Şekil 18. Force düktilite deneyi numuneleri ((a)oda sıcaklığında, (b)su banyosunda)



Şekil 19. Force düktilite deneyinin yapılışı

2.2.2.5. RV Deneyinin Yapılışı

Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerini ortaya koymak için RV deneyi yapılmıştır. Akışkan hale gelecek kadar ısıtılan bitümden 11 gr alınarak silindirik numune kalıplarına dökülmüştür ve numune kalıbı test cihazına yerleştirilmiştir. Numune kalıbı yaklaşık 10 dk sabit sıcaklıkta bekledikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Orijinal ve modifiye bitüm numunelerinin 90°C, 105°C, 135°C, 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri dönel viskozimetre cihazıyla ölçülmüştür. Her bir sıcaklık değeri için 3 okuma gerçekleştirilmiştir ve bu üç değerın ortalaması alınarak her bir numunenin viskozite değeri elde edilmiştir. Orijinal ve modifiye edilmiş numunelerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP değerlerine karşılık gelen sıcak asfalt karışımlardaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmıştır. Şekil 20’de Brookfield Viskozimetre deney aleti gösterilmiştir.



Şekil 20. Brookfield viskozimetre deney aleti

2.2.2.6. DSR Deneyinin Yapılışı

Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izine karşı gösterdiği direnci belirlemek için DSR deneyi yapılmıştır. Deney için, bitüm akışkan hale gelecek şekilde ısıtıldıktan sonra 25 mm çapa ve 1mm yüksekliğe sahip numuneler elde edilmiştir. DSR

cihazındaki plakalar arasındaki yükseklik 1mm'ye ayarlanmıştır. Numuneler cihazdaki plakalar arasına yerleştirilmiştir. Numunelere, 1,59 devir/sn dönme frekansı (10 rad/sn) ve 120 Pa sabit gerilme (kontrollü gerilme altında) uygulanarak bitümlü bağlayıcının 64 °C, sıcaklıktaki faz açısı (δ), tekerlek izi dayanımı parametresi ($G^*/\sin\delta$, Pa) ve kompleks kayma modülü (G^* , Pa) değeri belirlenmiştir. Şekil 21'de DSR deney aleti gösterilmiştir.



Şekil 21. DSR deney aleti

2.2.2.7. RTFOT Deneyinin Yapılışı

Kısa süreli yaşlandırma işlemi sırasında bitümlü bağlayıcı numunenin sıcaklık ve havanın etkisiyle oluşan kütle kaybının belirlenmesi ve deney sonrasında yaşlanmış numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için RTFOT deneyi yapılmıştır. Deneyde kullanılmak üzere 8 adet cam şişenin her birinin içine 35'er gr bitüm yerleştirilmiştir. Her bir şişenin deney öncesi ağırlığı hassas terazi yardımıyla belirlenerek kaydedilmiştir. İçinde bitüm olan 8 adet cam şişe 163 °C sıcaklığa ayarlanmış olan etüvdeki yuvalarına yerleştirilerek düşey ekseninde 75 dakika boyunca dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. Dönme esnasında RTFOT cihazının içinde bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 400 ± 200 ml/dak olacak şekilde hava verilmiştir. Sıcaklığın ve düşey ekseninde dönmenin etkisiyle bitüm, cam şişenin etrafını ince bir film şeridi halinde kaplamış ve bu sayede yaşlanma işlemi kolaylaştırılmıştır. Deney sonrasında, 2 şişedeki numune tekrar tartılarak bitümde oluşan kütle kaybı belirlenirken, geriye kalan 6 şişedeki

numuneler ile bitümlü bağlayıcıların yaşlandıktan sonraki özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyi yapılarak tespit edilmiştir. Şekil 22’de RTFOT deney numuneleri ve yapılış adımları gösterilmektedir.



Şekil 22. RTFOT deneyi numuneleri ve deney yapılış adımları

Saf bitüme ilişkin fiziksel özellikler Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Deneyler sonucu saf bitüme ait elde edilen fiziksel özellikler

Uygulanan Deney	Standart	Değer
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	57
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	50
Düktilite (25 °C, 5cm/dk), cm	ASTM D113	100+
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonrası		
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	29
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	56,2
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0,06

2.3. Aspir Yağı

Bu çalışma kapsamında kullanılan aspir yağı dehabiodizel firması tarafından temin edilmiştir. Ayrıca aspir yağının kimyasal yapısı FT-IR analizi yapılarak ortaya konulmuştur. FT-IR analizinin yapılışı hakkında detaylı bilgi 2.2.1’de verilmiştir.

2.4. Borik Asit

Bu çalışma kapsamında kullanılan borik asit Etimaden Kütahya- Emet Bor İşletme Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Borik asitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 12’de verilmiştir [161].

Tablo 12. Borik asite ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Borik Asit Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	
Özgül Ağırlık	1, 51 g/cm ³ (20 °C)
Dökme Yoğunluğu	0,928 g/cm ³ (Granül: Normal, Düşük S.) 0,750 g/cm ³ (Toz)
Molekül Ağırlığı	61,83 g/mol
Erime Noktası	450 °C
Kaynama Noktası	1860 °C

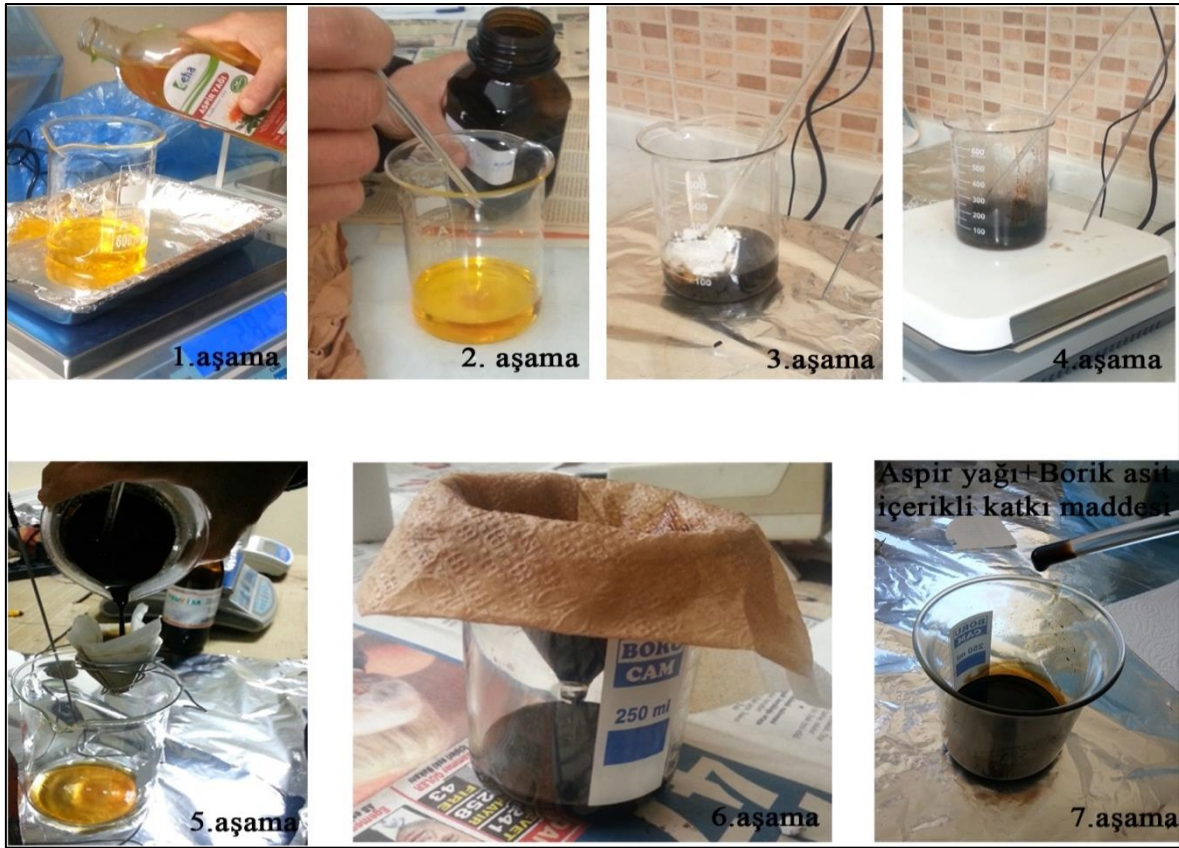
2.5. Bitümün Modifiye Edilmesi

2.5.1. Modifiyerin (Katkının) Elde Edilmesi

Bu bölümde, laboratuvar ortamında kimyasal olarak katkı maddesinin nasıl elde edildiği anlatılmaktadır. Soğuk press yöntemiyle elde edilen aspir yağının ortalama molekül ağırlığının 877,20 g/mol olduğundan yola çıkılarak yaklaşık 87,7 gram (0,1 mol) aspir yağı üzerine oleik asit cinsinden karşılık gelen 19,6 gram borik asit (0,35 mol) ilave edilip karışımın üstüne birkaç ml kadar sülfirik asit ilave edilerek karışım 800 ml ‘lik cam kaplı beherde 150 °C ‘de yaklaşık 4-5 saat karıştırıldı. Reaksiyona girmeyen borik asit ve reaksiyon sırasında oluşan bozulma ürünleri siyah bant (numaralı) süzgeç kağıdından süzülerek ortamdan uzaklaştırıldı. Dinlenmeye bırakılan katkıda tekrar oluşan tortular

yeniden süzülerek homojen bir katkı elde edilmesi sağlandı. Koyu kahverengi renkte katkı bor içeriğinin varlığını tespit için spektroskopik analize tabi tutuldu. Süzgeç kağıdının üzerinde az miktar bor içeriği kaldığı gözlemlendiğinden yaklaşık %80 verim elde edilmiştir. Katkı maddesinin elde edilme adımları Şekil 23’de gösterilmiştir.

Sentezlenen katkı maddesinin kimyasal yapısı FT-IR analiziyle ortaya konulmuştur. Katkı maddesine yapılan FT-IR analizinin yapılaş şekli hakkında detaylı bilgi Bölüm 2.2.1’de verilmiştir.



Şekil 23. Katkı maddesinin elde edilme aşamaları

2.5.2. Modifiyerin Bitüme Katılması

150 °C sıcaklıktaki etüvde akışkan hale gelene kadar ısıtılan B50/70 penetrasyonlu saf bitümden belli bir miktar behere dökülmüştür ve üzerine bitüm ağırlığının %0,3, %0,5, %0,7, %1 oranlarında aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesi ilave edilmiştir. Bitüm ve katkı maddesi, 30 dakika, 1000rpm hızda, 150 °C sıcaklıkta mekanik karıştırıcı

yardımla karıştırılarak modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Şekil 24’te modifiye bitüm numunelerinin elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 24. Modifiye bitüm numunelerinin elde edilmesi

2.6. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler

2.6.1. Modifiye Bitümün Yapısal Analizi

Sentezlenen organik katkı maddesinin saf bitüme eklenmesi sonucu saf bitümün yapısında meydana gelen kimyasal değişimler FT-IR analizi yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca, katkı maddesinin bitüm içerisinde homojen bir şekilde dağılım sağlayıp sağlamadığını gözlemlemek ve modifiye bitüm numunelerinin uygun karıştırma şartları altında elde edilip edilmediğini ortaya koymak amacıyla SEM analizi yapılmıştır. FT-IR ve SEM analizleri “Saf Bitümün Yapısal Analizi” adlı bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.6.2. Modifiye Bitümlere Uygulanan Geleneksel ve Superpave Deneyleri

Modifiye edilmiş bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve force düktilite deneyleri uygulanarak bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Ayrıca, elde edilen yumuşama noktası ve penetrasyon değerleri yardımıyla penetrasyon indeksi hesaplanmış ve bu hesaplama sonucunda bitümlü bağlayıcı numunelerinin sıcaklık hassasiyetleri belirlenmiştir. Modifiye edilmiş bitüm numunelerine DSR, RV, RTFOT deneyleri uygulanarak bitümlü bağlayıcı numunelerinin reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Modifiye bitüme uygulanan deneyler “Geleneksel ve Superpave Deneyleri” başlığı altında açıklanmıştır. Deneyler sonucunda saf ve farklı oranlarda modifiye bitüme ait elde edilen fiziksel özellikler Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Saf ve farklı oranlarda modifiye bitüme ait belirlenen fiziksel özellikler

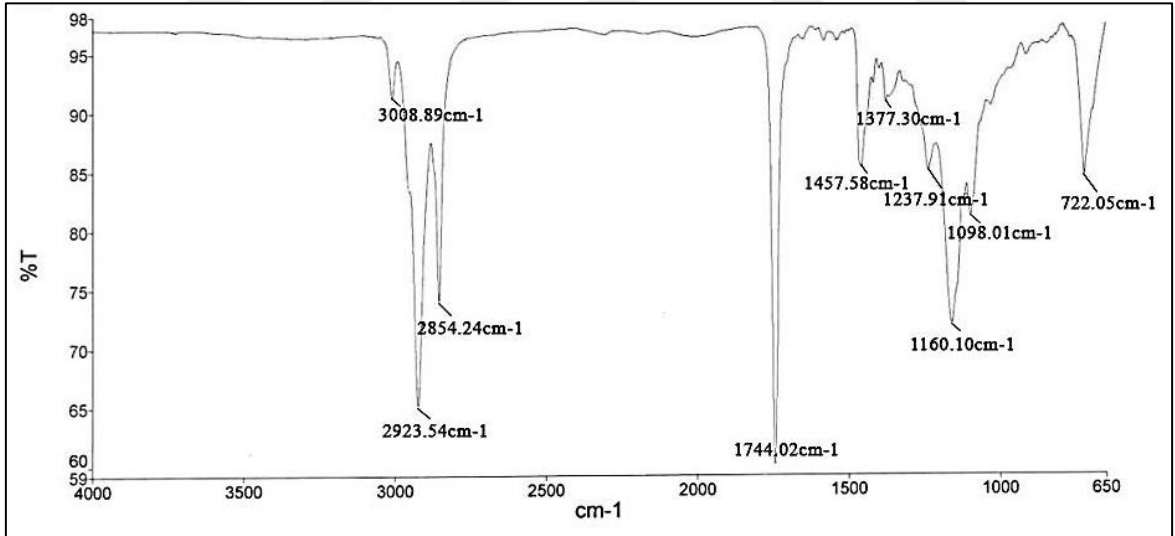
Uygulanan Deneyler	Standart	Katkı yüzdesi (%)				
		%0 (Saf Bitüm)	%0,3	%0,5	%0,7	%1
Penetrasyon, dmm	ASTM D5	57	44,8	45,5	46,5	49,6
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	50	51,1	51,1	51,4	51,4
Düktilite, cm	ASTM D113	100+	100+	100+	100+	100+
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Sonrası (RTFOT)						
Penetrasyon, dmm	ASTM D5	29	36,2	37	38,6	42,2
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	56,2	53,4	52,8	52,75	52,2
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0,06	0,041	0,041	0,04	0,035

3. BULGULAR VE İRDELEME

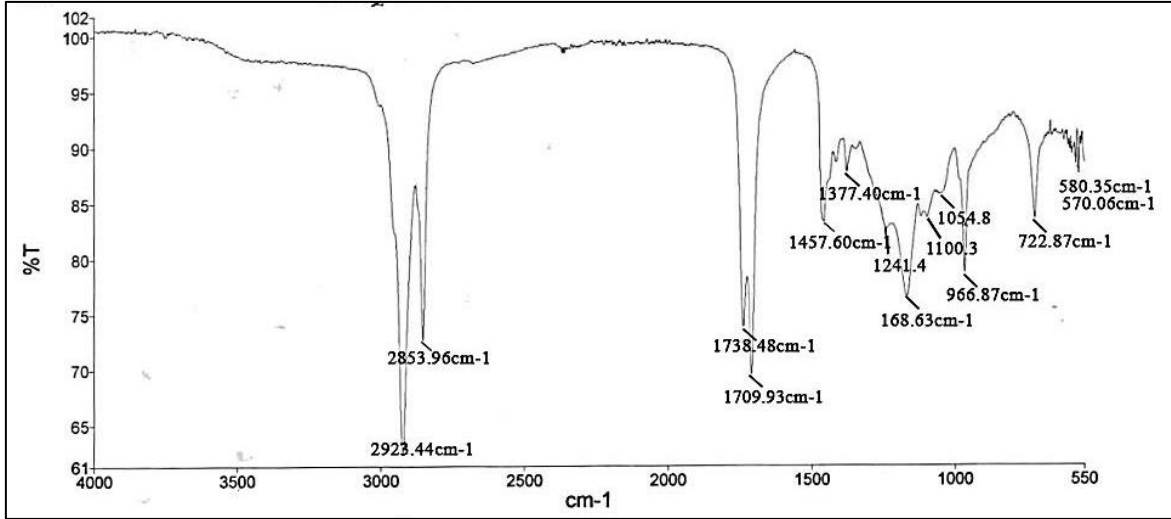
Bu bölümde, orijinal ve sentezlenen katkı maddesinin farklı oranlarda bitüme ilave edilmesi sonucu elde edilen modifiye bitüme uygulanan deneylerin sonuçları sunulmuştur. Yapılan tüm deneylerde orijinal ve farklı katkı oranlarındaki modifiye bitümlerin değerleri karşılaştırılarak, katkı maddesinin bitümün fiziksel ve reolojik yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.1. Sentezlenen Katkının FT-IR Analizi Sonuçları

Aspir yağının ve aspir yağından borik asitle sülfirik asit katalizörlüğünde sentezlenen katkı maddesinin yapısal analizini belirleyen FT-IR spektrumlarından elde edilen spektral verilerin değerlendirilmesi Şekil 25-26'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 25. Aspir yağının FT-IR spektrumu (Spektrum 1)



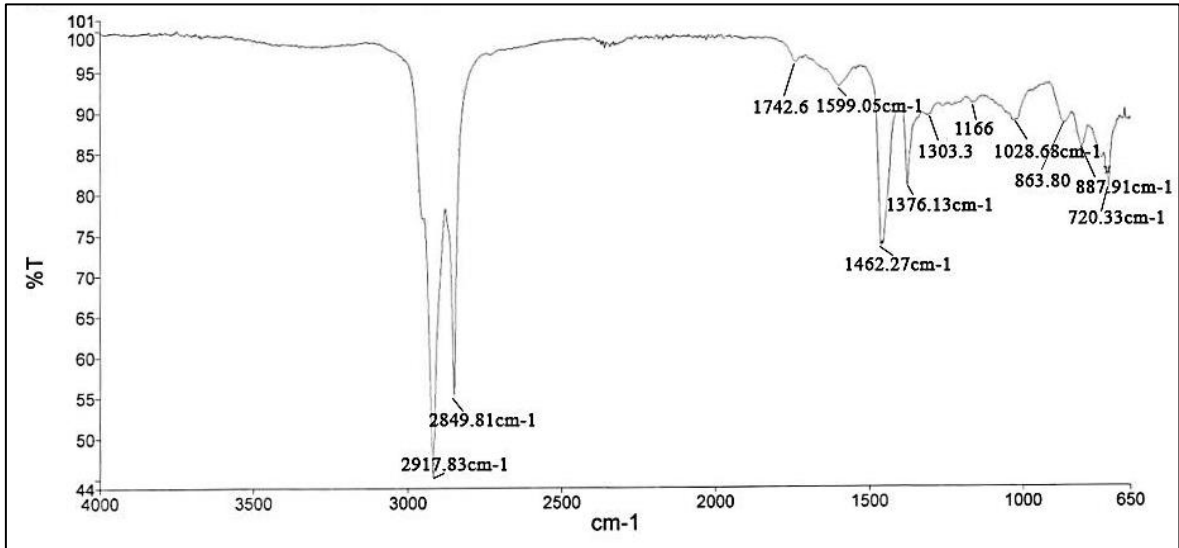
Şekil 26. Sentezlenen katkının FT-IR spektrumu (Spektrum 2)

Katkı yapımında kullanılan aspir yağı FT-IR spektrumu (spektrum 1) incelendiğinde, yaklaşık olarak $2854\text{--}2923\text{ cm}^{-1}$ de yağ - hidrokarbon iskeletine ait C-H gerilim bantları gözlenmektedir. Yağın C=O grubuna ilişkin spektral bant 1744 cm^{-1} de ortaya çıkarken, hidrokarbon zincirine ait CH_3 ve CH_2 gruplarına ilişkin deformasyon bantları 1377 ve 1457 cm^{-1} de ortaya çıkmaktadır. Aspir yağında (O-C=O) ester grubuna ilişkin bandın 1160 cm^{-1} geniş bir bant olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

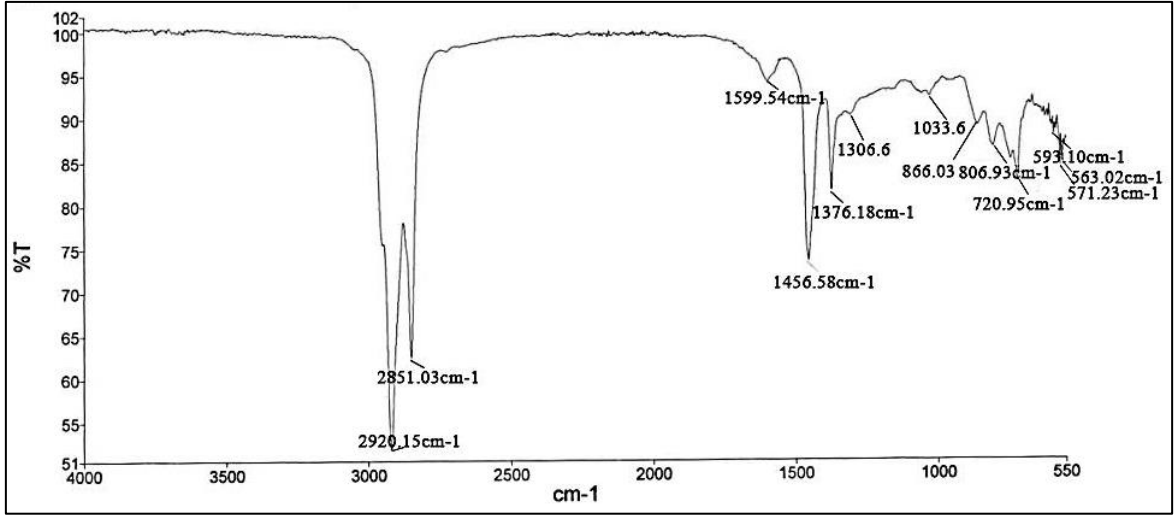
Aspir yağından borik asitle sülfirik asit katalizörlüğünde sentezlenen katkıya ilişkin FT-IR spektrumu (spektrum 2) incelendiğinde, yağ zincirine ilişkin C-H gerilim bantlarının aspir yağında gözlenen spektral bantlarla aynı bölgede gözleendiği ortaya çıkmaktadır. Bu bölge $2853\text{--}2923\text{ cm}^{-1}$ dir. Buna karşılık borun aspir yağının yapısına katıldığına ilişkin en önemli veri aspir yağında 1744 cm^{-1} 'de ortaya çıkan C=O gerilim bandının katkıda yağın esterik fonksiyonunun bor ile oluşturduğu koordinasyon sonucu farklılaştığı ve aspiden farklı olarak büyük oranda değişimle C=O gerilim bandının $1709\text{--}1738\text{ cm}^{-1}$ ortaya çıktığı gözlenmektedir. Bu sonuç borik asitin, aspir yağının bünyesindeki trigliserit esterinin farklı karbon uzunluğundaki karbonil fonksiyonlarına (C=O) koordine olduğunu ortaya koymaktadır. Spektral veriler borik asit katkılı modifiye yağ katkısının başarıyla sentezlendiğini ortaya koymaktadır.

3.2. Orijinal ve Farklı Katkı Oranlarındaki Modifiye Bitümlü Bağlayıcıya İlişkin FT-IR Analiz Sonuçları

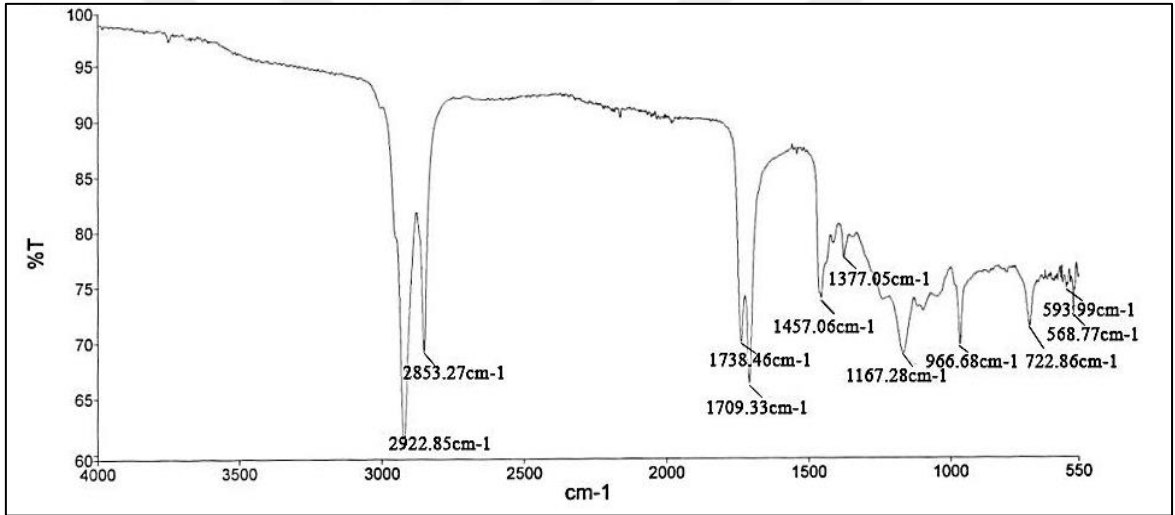
Bu çalışma kapsamında kullanılan orijinal ve %0,3, %0,5, %0,7, %1 oranlarında katkı ilaveli bitüme ilişkin FT-IR spektrumları Şekil 27 (spektrum3) ve Şekil 28 (spektrum 4) de sunulmuştur. Borik asit birlikte aspir yağı sentezlenerek elde edilen katkının %0,3, %0,5,%0,7, %1 oranlarında bitüme ilave edilmesine ilişkin FT-IR spektrumunda katkı oranlarının çok düşük olması sebebiyle katkıya ilişkin spektral veriler (Şekil 28), saf asfaltın çekilen FT-IR spektrumuyla (Şekil 27) karşılaştırıldığında zayıf bantlar ortaya çıktığı gözlenmektedir. Bu yüzden bitüm içinde katkının var olduğunu gösterebilmek için yaklaşık %10 oranında katkı ile bitüm karıştırılarak bitüm içinde katkının gözlenmesine çalışılmıştır. %10 oranındaki katkı ile elde edilmiş modifiye bitümün FT-IR spektrumu Şekil 29 (spektrum 5) 'da sunulmuştur. Sonuç olarak, Şekil 31 'de hem bitüm hem de katkıya ilişkin spektral bantlar tamamen gözlenmiştir. Bu bantlar $2853-2922\text{ cm}^{-1}$ 'de bitüm ve yağ zincirine ilişkin C-H gerilim bantları, $1709-1738\text{ cm}^{-1}$ 'de katkıya ilişkin C=O gerilim bantları, $1377-1457\text{ cm}^{-1}$ 'de sırasıyla CH_2 ve CH_3 deformasyon bantları olarak ifade edilebilir.



Şekil 27. Orijinal bitümün FT-IR spektrumu (Spektrum 3)



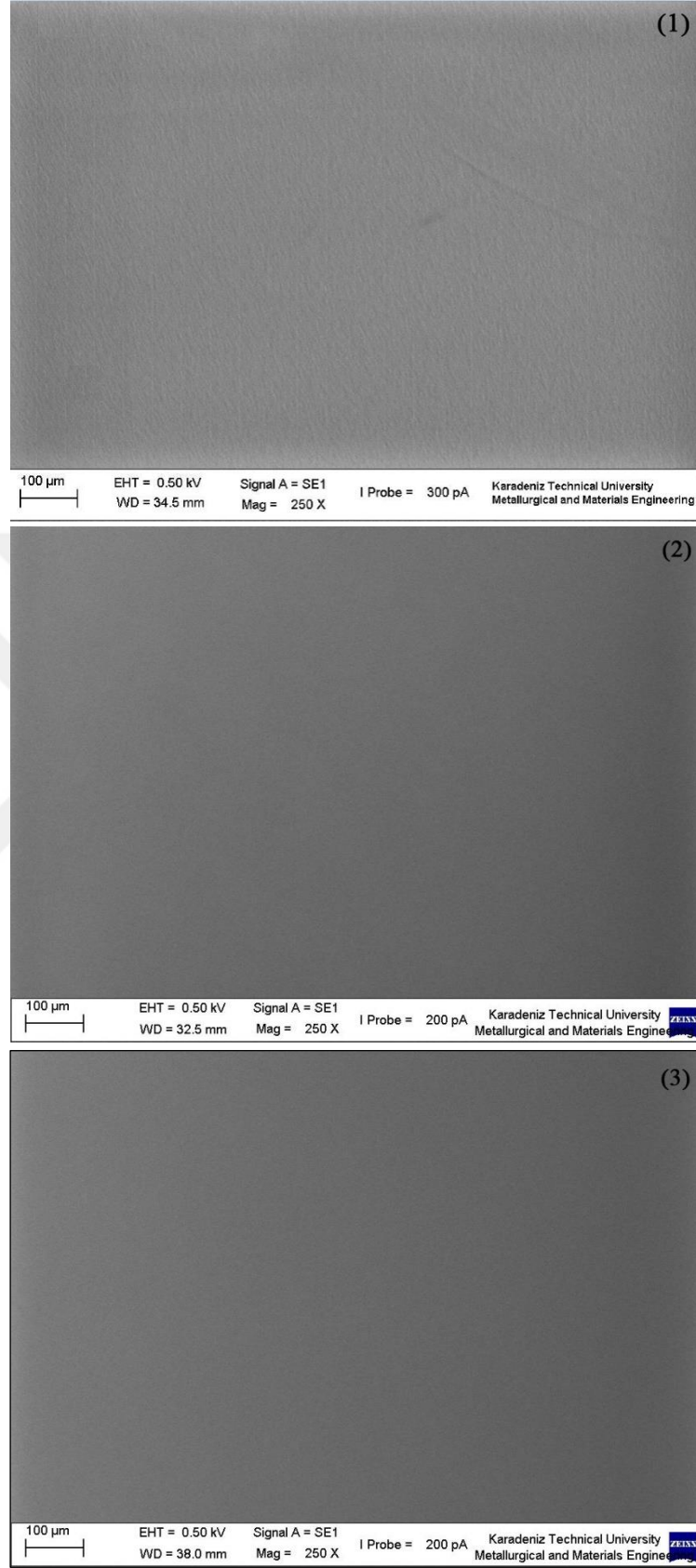
Şekil 28. Farklı oranlarda katkı ilaveli bitüme ilişkin FT-IR spektrumu (Spektrum 4)



Şekil 29. % 10 katkılı modifiye bitümün FT-IR spektrumu (Spektrum 5)

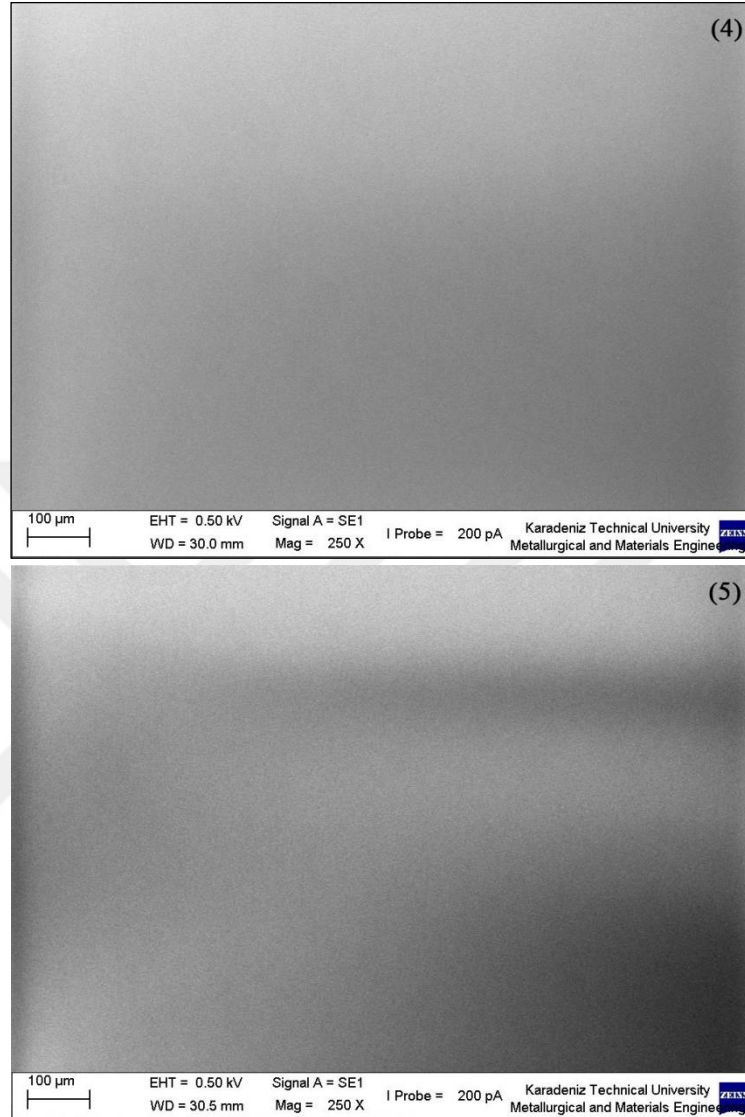
3.3. Orijinal ve Modifiye Bitüm Numunelerinin SEM Analiz Sonuçları

Çalışmada kullanılan orijinal ve katkılı bitüm numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 30'da sunulmuştur.



Şekil 30. SEM görüntüleri; (1) Orijinal, (2) %0,3 katkılı, (3) %0,5 katkılı, (4) %0,7 katkılı, (5) %1 katkılı bitümlü bağlayıcı numuneleri

Şekil 30'un devamı



Şekil 30'daki SEM görüntüleri incelendiğinde, bitüme katılan katkı miktarı yüzdelерinin çok düşük olmasından dolayı katkının bitüm içerisinde homojen dağılıp dağılmadığı gözlemlenememiştir. Fakat katkının bitüme net bir şekilde tutunduğu bir önceki başlıkta belirttiğimiz gibi FT-IR analizleri sonucunda gözlemlenmiştir.

3.4. Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

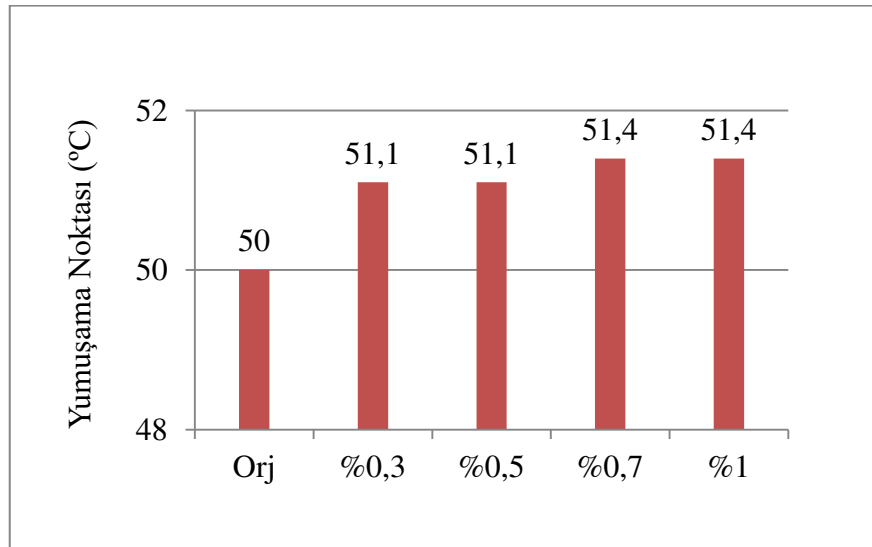
Orijinal ve farklı yüzde oranlarında katkı katılarak elde edilen modifiye bağlayıcılar için penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Elde edilen penetrasyon ve

yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 31 ve Şekil 32’de gösterilmiştir ve bu sonuçlara göre hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) değerleri Tablo 14’de sunulmuştur.

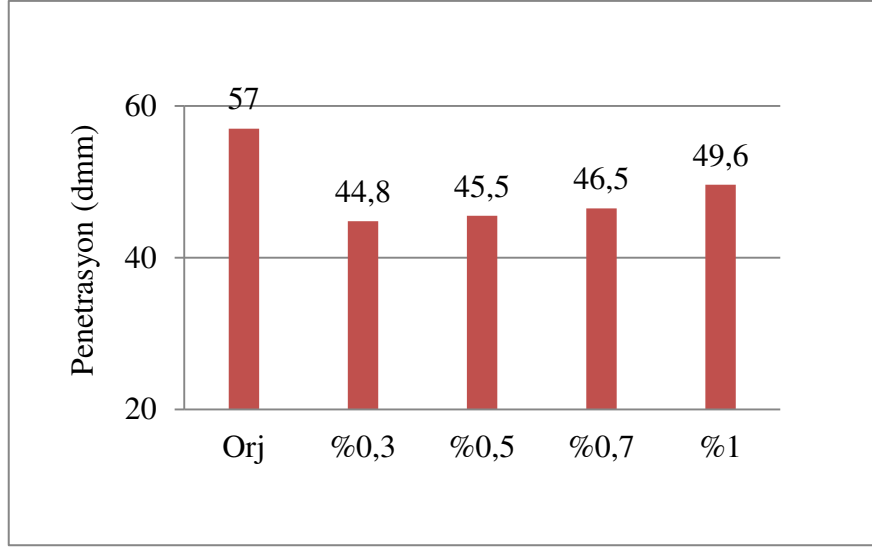
Tablo 14. Penetrasyon, yumuşama noktası ve PI değerleri

	%Katkı Oranı	Penetrasyon (25°C, dmm)	Yumuşama Noktası (°C/°K)	Penetrasyon İndeksi, (PI)
Katkısız	Orijinal Bitüm (%0)	57	50	-0,90093
Aspir Yağı ve Borik asit içerikli katkı oranı	0,3	44,8	51,1	-1,17874
	0,5	45,5	51,1	-1,14507
	0,7	46,5	51,4	-1,02552
	1,0	49,6	51,4	-0,88033

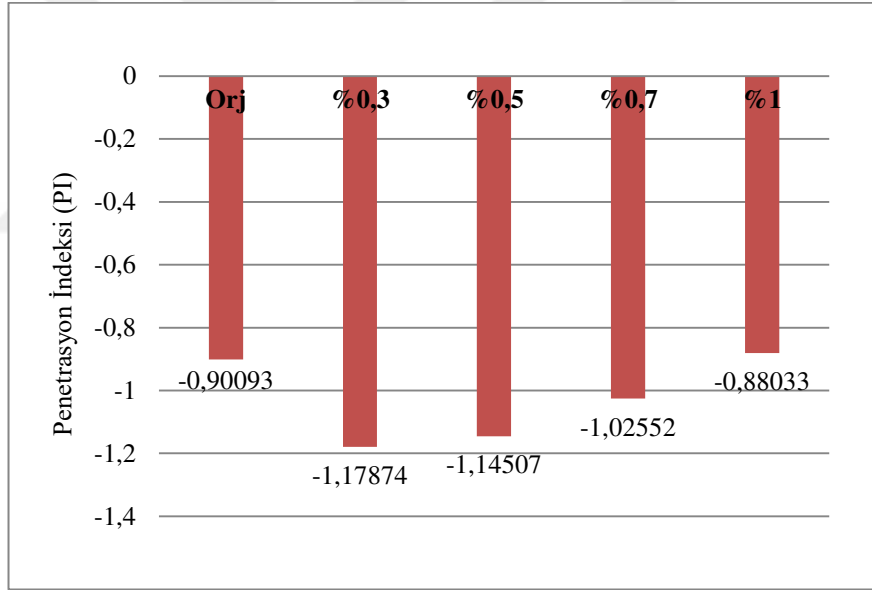
Bulgular incelendiğinde, modifiye bağlayıcılar orijinal bitümle karşılaştırıldığında penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama noktası değerlerinde ise artış gözlenmiştir (Şekil 31 ve Şekil32). Orijinal bitümün penetrasyon değeri %0,3, %0,5, %0,7, %1 katkı içeriği için sırasıyla %24,4, %23, %21 ve %14,8 oranlarında azalırken, yumuşama noktası değeri ise sırasıyla %2,2, %2,2, %2,8 ve %2,8 oranlarında artmıştır. Penetrasyon ve yumuşama noktalarındaki bu değişimler PI değerlerinin yükselmesine, orijinal bitümün kıvamının artmasına ve sıcaklık hassasiyetinin azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 31. Yumuşama noktası deneyi sonuçları grafiği



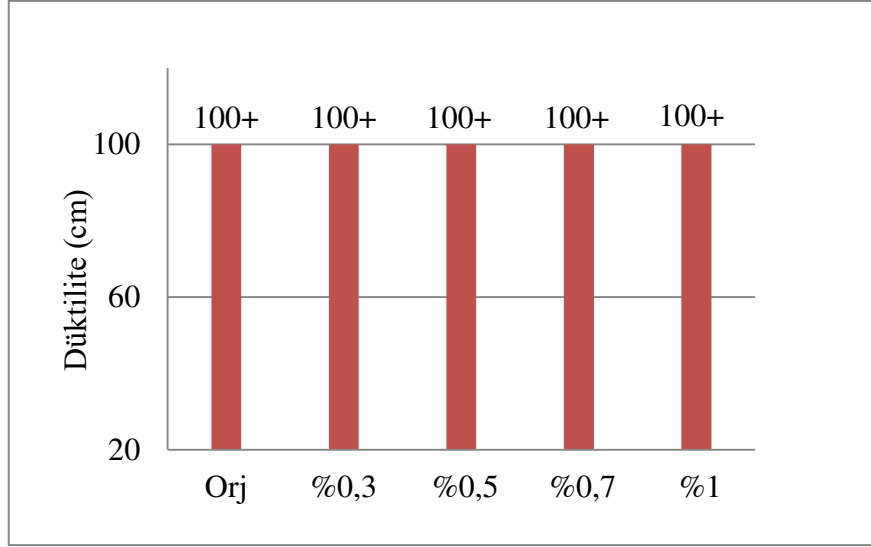
Şekil 32. Penetrasyon deneyi sonuçları grafiği



Şekil 33. Penetrasyon İndeksi grafiği

3.5. Düktilite Deneyi Sonuçları

Orijinal ve modifiye edilmiş bitümlere 25°C sıcaklık altında uygulanan düktilite deneyinin sonuçları Şekil 34' de gösterilmiştir.



Şekil 34. Düktilite deney sonuçları grafiği

Bulgular incelendiğinde, bitüme eklenen katkı miktarı artmasına rağmen orijinal bitümün düktilite değerinde herhangi bir değişiklik olmadığı diğer bir deyişle elde edilen katkı maddesinin bitümün uzama özelliğini değiştirmedeği gözlenmiştir (Şekil 33). İyileşme olup olmadığını gözlemlemek için daha ileri deney yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.6. Force Düktilite Deneyi Sonuçları

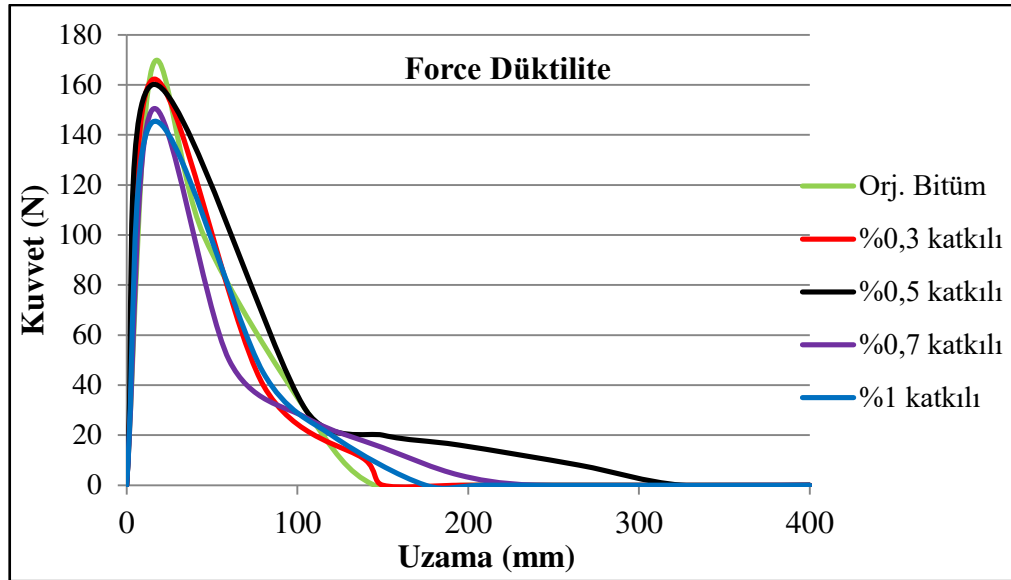
Orijinal ve modifiye edilmiş bitümlere +5 °C ve +10 °C sıcaklıkta uygulanan force düktilite deneyinin sonuçları Tablo 15’te sunulmuştur ve bu değerler grafiksel olarak Şekil 35’te ve Şekil 36’da gösterilmiştir. Bu deney İsfalt Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

+5 °C ve +10 °C sıcaklıktaki deney sonuçları incelendiğinde saf ve katkılı bitümlerin 1-4 mm uzama miktarında maksimum kuvvete ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 35). +5 °C sıcaklıkta orijinal bitümün uzama miktarı değerlerinin %0,3, %0,5, %0,7 ve %1 katkı içerikleri için sırasıyla %3,4, %124, %44,8 ve %22,75 oranında arttığı gözlenmektedir. +5 °C sıcaklıkta %0,5 oranında katkı maddesinin deney sonuçlarının saf bitüm ve diğer katkı oranlarının sonuçlarıyla karşılaştırıldığında en iyi sonucu verdiği gözlenmektedir. Yani +5 °C sıcaklıkta %0,5 oranında katkı maddesinin diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında bitümün gerilme performansını daha fazla arttırdığı ve uzama özelliklerini daha fazla geliştirdiği gözlenmiştir (Tablo 15). +10 °C sıcaklıkta ise tüm numunelerin kopmadan

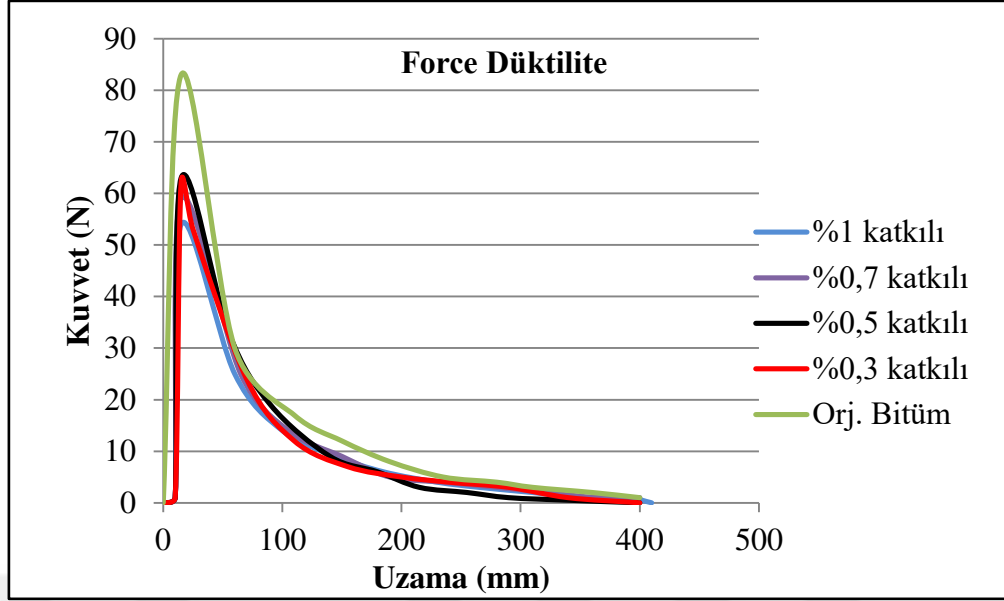
deneyi başarıyla tamamladıkları gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta, orijinal bitüme katkı maddesi eklendikçe maksimum kuvvetin orijinal bitüm için elde edilen değere göre azalma gösterdiği gözlenmiştir (Tablo 15).

Tablo 15. Force düktilite deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	%Katkı Miktarı	Maksimum Kuvvet (N)	Deformasyon Enerjisi (J)	Uzama Miktarı(mm)
+5 °C	0,0	0,14	0,0315	145
	0,3	0,16	0,0282	150
	0,5	13,04	0,9967	325
	0,7	0,16	0,0306	200
	1,0	0,16	0,0309	178
+10 °C	0,0	6,86	0,7469	400+
	0,3	4,14	0,2719	400+
	0,5	2,62	0,1436	400+
	0,7	4.84	0,4848	400+
	1,0	3.92	0,3169	400+



Şekil 35. +5 °C sıcaklıkta Kuvvet (N) – Uzama (mm) grafiği



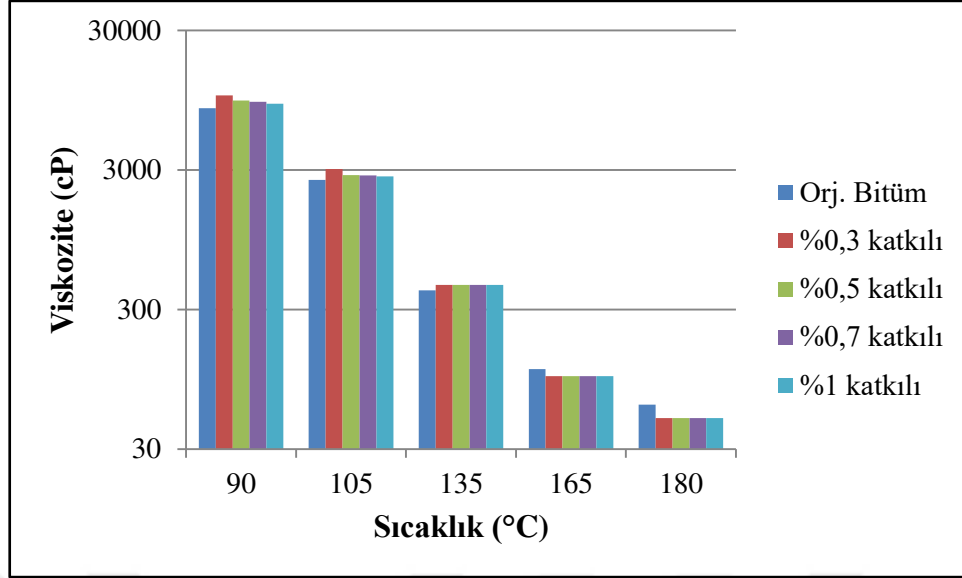
Şekil 36. +10 °C sıcaklıkta Kuvvet (N) – Uzama (mm) grafiği

3.7. Dönel Viskozimetre Deneyi Sonuçları (RV)

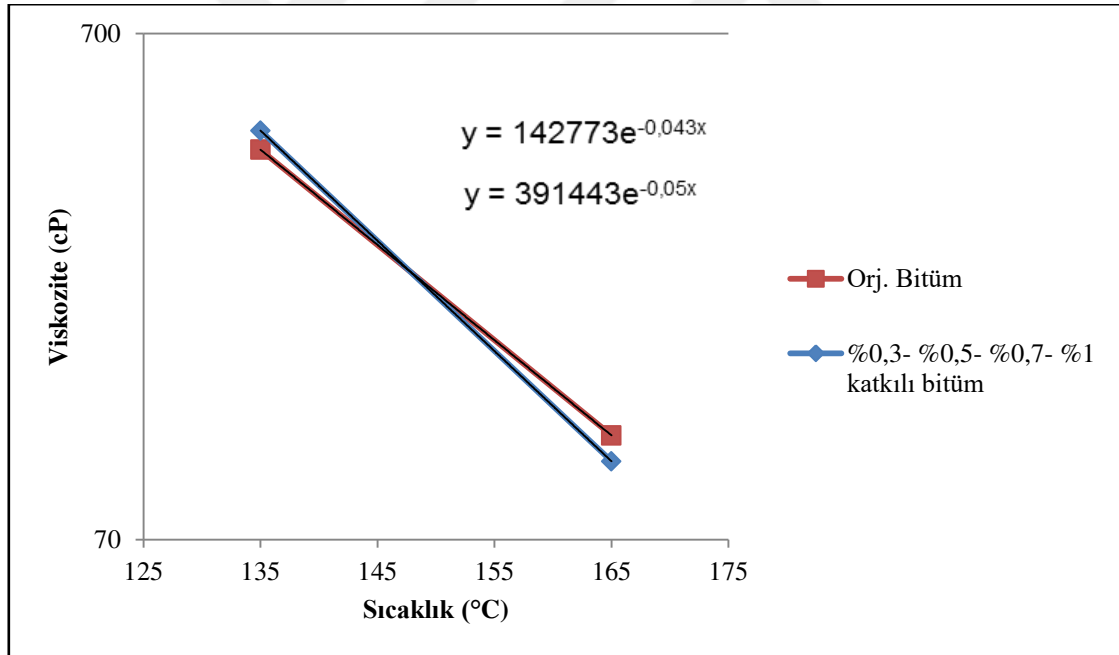
Orijinal ve modifiye bitümlerin 90 °C, 105 °C, 135 °C, 165 °C ve 180 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri RV deneyi yapılarak elde edilmiştir. Sonuçları Tablo 16 ve Şekil 37’de sunulmuştur. Bir sonraki adımda, 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri yardımıyla logaritmik sıcaklık- viskozite grafiği elde edilmiştir (Şekil 38). Bu grafik yardımıyla 170 ± 20 cP ve 280 ± 30 cP değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmiş ve bu değerler Tablo 17’de sunulmuştur.

Tablo 16. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları, cP

Numune Adı	90 °C	105 °C	135 °C	165 °C	180 °C
Orijinal Bitüm	8346	2550	412,5	112,5	62,5
%0,3	10266	3050	450	100	50
%0,5	9450	2766	450	100	50
%0,7	9250	2750	450	100	50
%1	8983	2700	450	100	50



Şekil 37. Saf ve katkıli bağlayıcı numunelerinin 90 °C, 105 °C, 135 °C, 165 °C ve 180 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri



Şekil 38. Orijinal ve katkıli bitümlerin sıcaklık- viskozite grafiği

Tablo 17. Orijinal ve modifiye bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Numune İsmi	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	
Orijinal Bitüm	160	154	148	143
%0,3 katkılı	157	153	147	143
%0,5 katkılı	157	153	147	143
%0,7 katkılı	157	153	147	143
%1 katkılı	157	153	147	143

Katkı maddesi, deneyin yapıldığı 90°C, 105°C ve 135°C sıcaklıklarda orijinal bitümün viskozite değerini artırırken, deneyin yapıldığı 165°C ve 180°C sıcaklıklardaki orijinal bitümün viskozite değerini azaltmıştır. Orijinal bitümün 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri %0,3, %0,5, %0,7, %1,0 oranlarındaki katkı içeriklerinin hepsi için %9,09 oranında artarken, 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri de %11,11 oranında azalmıştır. Tablo 16’da da görüldüğü gibi, 135°C sıcaklıktaki modifiye bitümlerin viskozite değerleri 3000 cP şartname sınırını geçmemiştir. %0,3, %0,5, %0,7, %1 oranında katkı maddesi içeren modifiye bitüm numunelerinin karıştırma sıcaklık aralıklarında orijinal bitüme göre az bir miktar azalma olurken sıkıştırma sıcaklık aralığında değişim olmamıştır (Tablo 17).

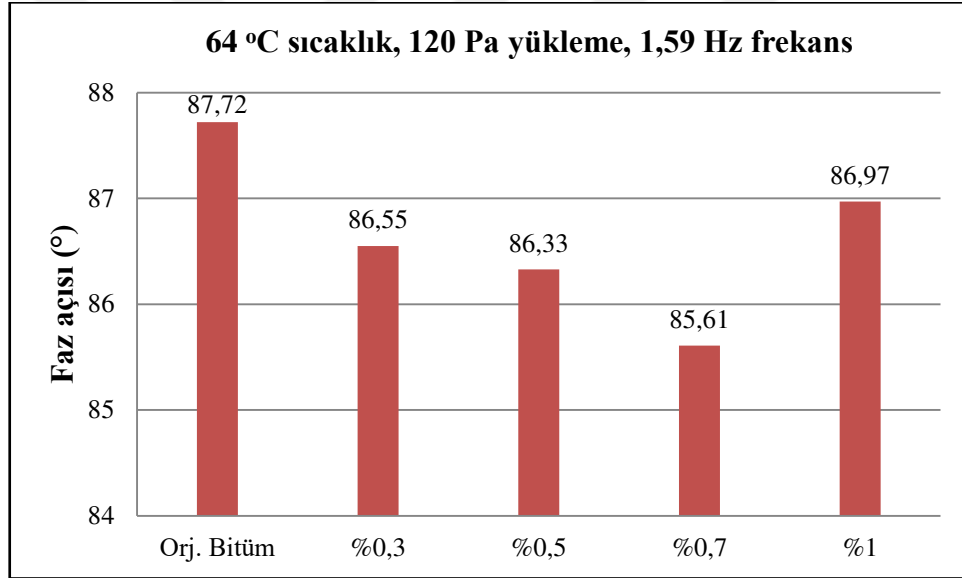
3.8. Dinamik Kesme Reometresi Deney Sonuçları

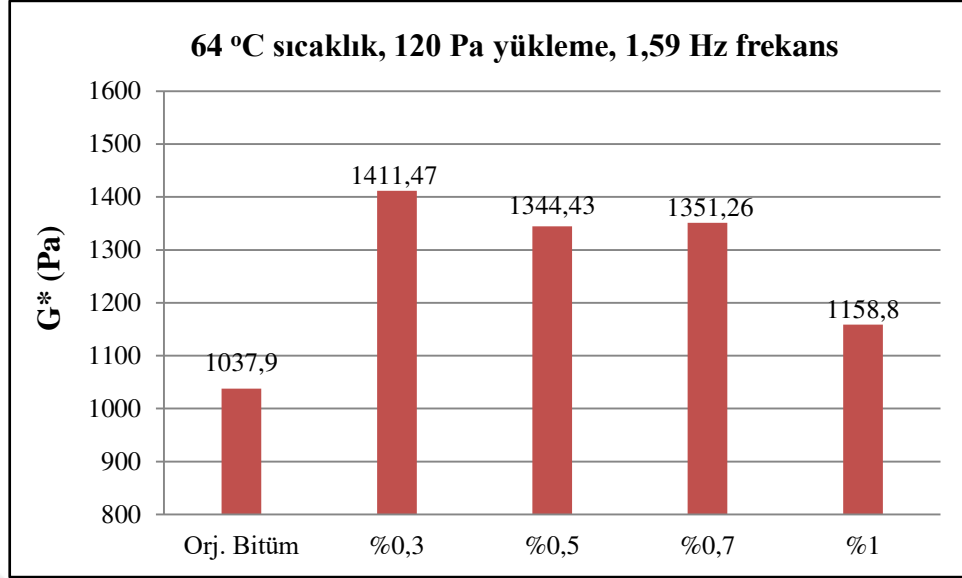
Deney aletindeki 25 mm paralel plakların arasındaki boşluk 1mm olacak şekilde ayarlanarak 64°C sabit sıcaklıkta, kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1,59 Hz (10 rad/s) frekansta DSR deneyi yapılmıştır. Bayburt Üniversitesi Laboratuvarında yapılan deney sonucunda δ , G^* , $G^*/\sin\delta$, G' ve G'' parametre değerleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. DSR deneyinden elde edilen sonuçlar

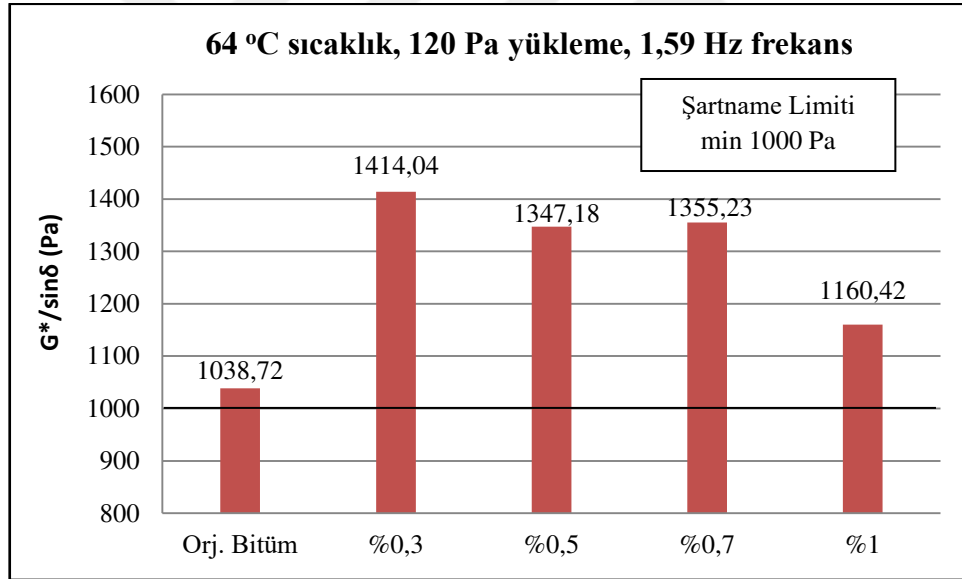
Numune Adı	Sıcaklık (°C)	δ (°)	G^* (Pa)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Saf Bitüm	64	87,72	1037,9	1038,72	41,22	1037,08	1000 min
%0,3	64	86,55	1411,47	1414,04	84,98	1408,91	
%0,5	64	86,33	1344,43	1347,18	85,98	1341,67	
%0,7	64	85,61	1351,26	1355,23	103,38	1347,3	
%1	64	86,97	1158,8	1160,42	61,23	1157,18	

DSR deneyi sonucunda elde edilen δ , G^* , $G^*/\sin\delta$ değerlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 39-41'de grafik halinde gösterilmiştir.

Şekil 39. 64 °C sıcaklıkta δ değerleri



Şekil 40. 64 °C sıcaklıkta G* değerleri



Şekil 41. 64 °C sıcaklıkta G*/sinδ değerleri

Şekil 39 ve 40’da verilen deney sonuçları incelendiğinde 64°C’de bitüme katılan katkı miktarı yüzdesi arttıkça bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü değerlerinde bir azalma görüldüğü, ancak tüm katkı oranlarında elde edilen kompleks kayma modülü değerlerinin saf bitüme göre artış gösterdiği, faz açısı değerlerinin ise saf bitüme göre azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer bir ifade ile katkı maddesinin, saf bitümün elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izine karşı direncini arttırdığı gözlenmiştir. Şekil 39 ve

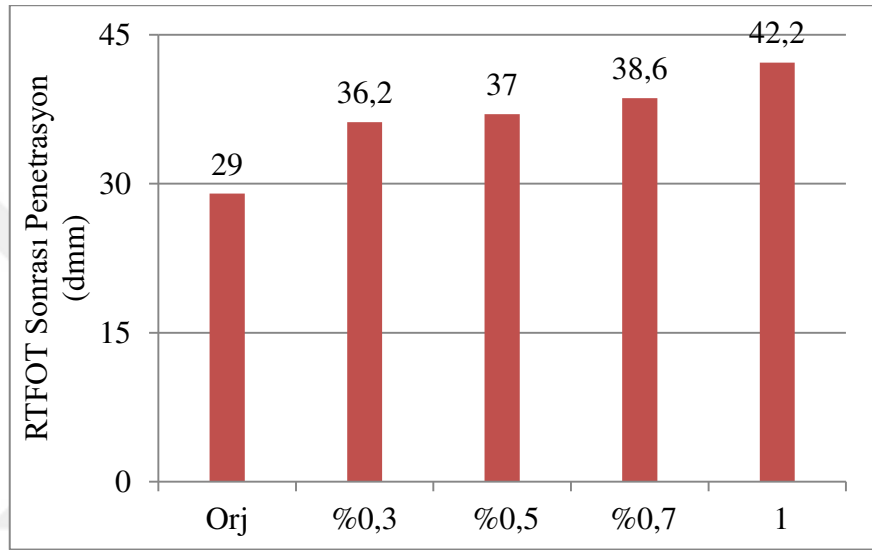
40'de verilen sonuçlar incelendiğinde, 64°C sıcaklıkta %0,3, %0,5, %0,7, %1 katkı içeriğinde bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin sırasıyla %36, %29,5, %30 ve %11 oranlarında arttığı, faz açısı değerlerinin ise %1,3, %1,6, %2,4 ve %0,86 oranında azaldığı görülmektedir. Buradan katkı maddesinin bitüme katılmasının saf bitümün elastik özelliğine fayda sağladığı ve tekerlek izine karşı direncini arttırdığı açık bir şekilde görülmektedir. En fazla artış oranı ise %0,3 oranında katkı maddesinin bitüme katılmasıyla elde edilmiştir. Şekil 41'deki $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde ise 64°C sıcaklıkta tüm katkı oranlarında minimum 1000 Pa şartname limitinin sağlandığı görülmektedir. Ayrıca tüm katkı oranlarında $G^*/\sin\delta$ değerlerinin saf bitümle kıyaslandığında artış gösterdiği ve en fazla artışın ise %0,3 oranında katkılı bitüm ile elde edildiği tespit edilmiştir.

3.9. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney Sonuçları (RTFOT)

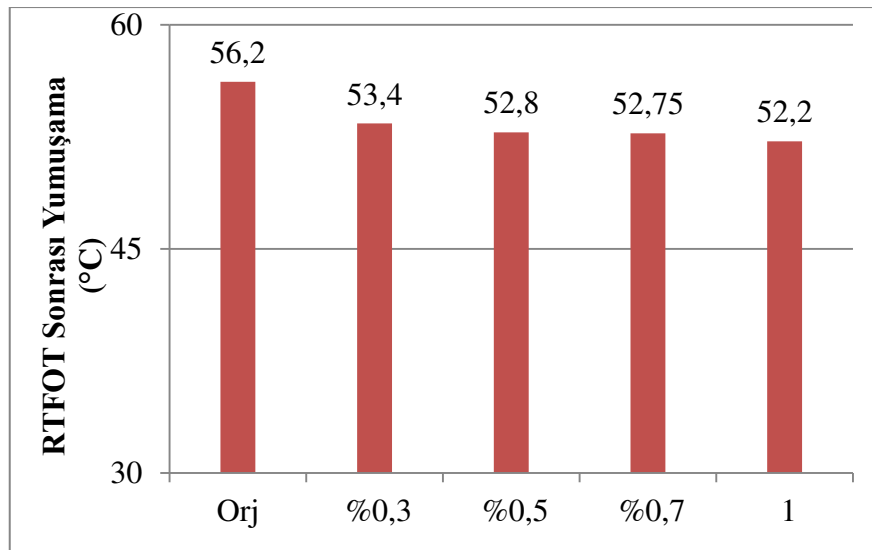
RTFOT deneyi sonrasında orijinal ve modifiye bitümlü bağlayıcı numunelere penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyi yapılmıştır ve deney bulguları Tablo 19'da ve Tablo 20'de verilmiştir. Şekil 42 ve Şekil 43'deki yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde orijinal bitümle karşılaştırıldığında artan katkı oranına bağlı olarak yumuşama noktası değerlerinin azaldığı, penetrasyon değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Şekil 44'deki ΔS değerleri incelendiğinde artan katkı miktarına bağlı olarak yumuşama noktası sıcaklık farkları orijinal bitüme göre azalma göstermiştir. Bu azalma miktarı %0,3, %0,5, %0,7, %1 katkı oranları için sırasıyla %62,9, %72,5, %78,2, %87,1 olarak hesaplanmıştır. Tablo 19'da verilen kütle kayıpları incelendiğinde, katkı oranı arttıkça kütle kayıplarında azalma olduğu görülmüştür. Bu sayede asfalt kaplamaların üretimi ve servis sırasındaki yaşlanmasının azaltılması yönünde çok önemli bir katkı sağlamakta, kaplamanın daha uzun süre bozulmadan hizmet etmesi anlamına gelmektedir.

Tablo 19. RTFOT deneyi sonrası bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri

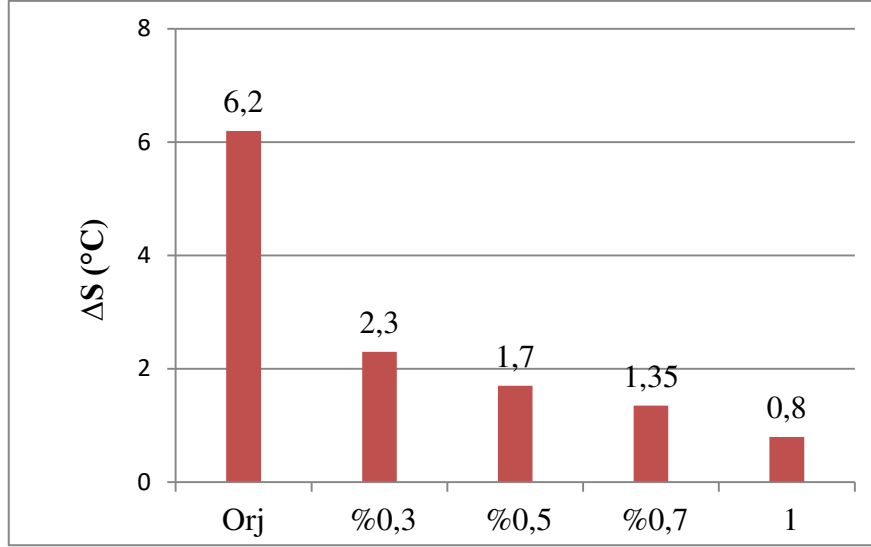
Yapılan Deneyler	%0 (Orj)	%0,3	%0,5	%0,7	%1
Penetrasyon (dmm)	29	36,2	37	38,6	42,2
Yumuşama Noktası (°C)	56,2	53,4	52,8	52,75	52,2
ΔS (°C)	6,2	2,3	1,7	1,35	0,8
Kütle Kaybı (%)	0,06	0,041	0,041	0,04	0,035



Şekil 42. RTFOT deneyi sonrası elde edilen penetrasyon değerleri



Şekil 43. RTFOT deneyi sonrası elde edilen yumuşama noktası değerleri

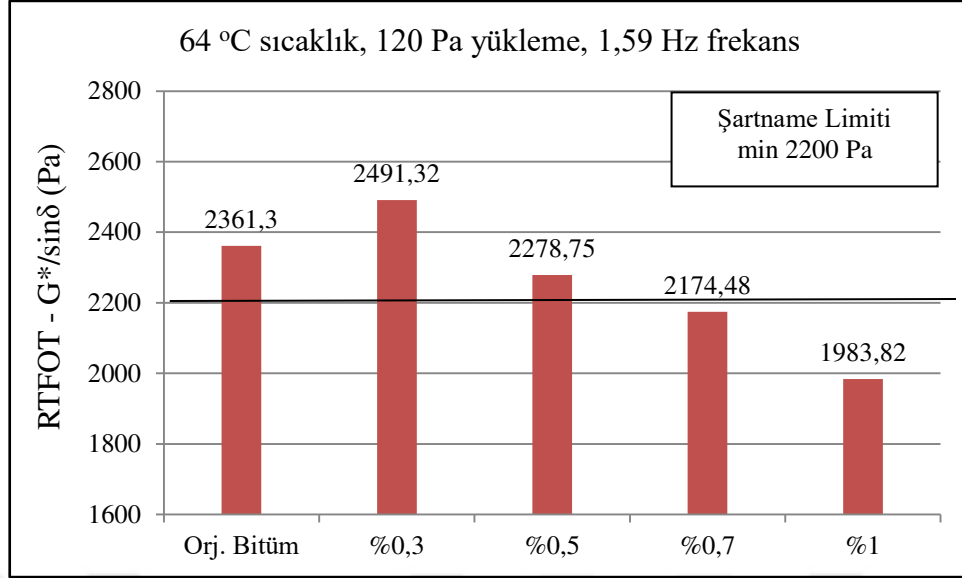


Şekil 44. RTFOT deneyi öncesi ve sonrasında elde edilen yumuşama noktası sıcaklık farkları

RTFOT deneyi sonrası saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılara DSR deneyi yapılmıştır. DSR deneyi, deney aletindeki 25 mm paralel plakların arasındaki boşluk 1mm olacak şekilde ayarlanarak 64°C sabit sıcaklıkta, kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1,59 Hz (10 rad/s) frekansta yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda δ , G^* , $G^*/\sin\delta$, G' ve G'' parametre değerleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 20’de, $G^*/\sin\delta$ değerleri ise grafik olarak Şekil 45’te verilmiştir.

Tablo 20. RTFOT deneyi sonrası DSR test sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	δ (°)	G^* (Pa)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Orjinal Bitüm	64	85,01	2352,33	2361,30	204,75	2343,41	2200 min
%0,3	64	85,31	2482,99	2491,32	202,85	2474,69	
%0,5	64	85,10	2270,4	2278,75	194,1	2262,09	
%0,7	64	85,25	2167,02	2174,48	179,4	2159,59	
%1	64	85,62	1978,03	1983,82	151,05	1972,25	



Şekil 45. RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri

Tablo 20’de verilen değerler incelendiğinde sadece %0,3 katkı oranlı modifiye bitümün G' , G'' , G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerleri, deneyin yapıldığı 64 °C sıcaklıkta saf bitümlü bağlayıcıya göre artış göstermiştir. Saf bitümlü bağlayıcıya göre %0,3 katkı içeriğinde $G^*/\sin\delta$ değerlerinde 64 °C’de %5,5 oranında artış olmuştur. Şekil 45’de görüldüğü üzere, şartname limiti olan minimum 2200 Pa değerini, 64 °C sıcaklıkta sadece %0,3 ve %0,5 katkı içeriği sağlamıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada, laboratuvar ortamında sentezlenen aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesinin bitüm ağırlığının %0,3, %0,5, %0,7, %1 oranlarında bitüme katılmasıyla elde edilen modifiye bitümlerin performansları saf bitüme göre kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Katkı maddesinin ve katkılı numunelerin yapısal analizi; FT-IR analizi ile tespit edilmiştir. Bu analiz sonucu elde edilen spektral veriler borik asitin aspir yağının yapısına başarıyla katıldığını ve hedef katkının başarıyla elde edildiğini ortaya koymuştur.

Saf bitüm ve %10 oranında katkılı bitümün FT-IR analizinden elde edilen spektral veriler incelendiğinde hem bitüm hem de katkıya ilişkin öngörülen spektral bantlar tamamen gözlenmiştir. Yapıya ilişkin olarak C-H gerilim bantları $2853-2922\text{ cm}^{-1}$ 'de bitüm ve yağ zincirine ait bantlar olarak, $1709-1738\text{ cm}^{-1}$ 'de katkıya ilişkin C=O gerilim bantları, $1377-1457\text{ cm}^{-1}$ 'de ise sırasıyla CH_2 ve CH_3 deformasyon bantları olarak ifade edilebilir. Katkının ve saf bitümün kaydedilen spektrumdaki FT-IR verileri karşılaştırılarak, bariz olarak C-H veya C=O gerilim bantlarında bir değişiklik olup olmadığı incelenmiş ve dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum katkı ve bitüm arasında elektrostatik seviyede bir kimyasal bağlantı olduğu tahminini güçlendirmiştir. Bu verilere bakıldığında katkının bitümün yapısına başarı ile iştirak ettiği gözlenmektedir.

SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bitüme katılan katkı miktarı yüzdelерinin çok düşük olmasından dolayı katkının bitüm içerisinde homojen dağılıp dağılmadığı gözlemlenememiştir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri incelendiğinde katkı maddesinin bitüme katılmasıyla penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama noktası değerlerinde ise artış görülmektedir. Penetrasyon değeri sonuçlarında en fazla azalış %0,3 katkılı bitümde %24,4 oranında görülürken, yumuşama noktası değeri en fazla artış %0,7 ve %1 katkılı bitümde %2,8 oranında olduğu görülmüştür. Penetrasyon ve yumuşama noktalarındaki bu değişimler PI değerlerinin yükselmesine, orijinal bitümün kıvamının artmasına ve sıcaklık hassasiyetinin azalmasına sebep olmuştur.

Düktilite deney sonuçları incelendiğinde, bitüme eklenen katkı miktarı artmasına rağmen orijinal bitümün düktilite değeri her hangi bir değişiklik olmadığı diğer bir

deyişle elde edilen katkı maddesinin bitümün uzama özelliğini değiştirmediği gözlenmiştir. Buna rağmen, force düktilite deneyi katkılı numunelerin uzama özelliği hakkında daha iyi sonuçlar verebilmektedir.

İsfalt Laboratuvarında yapılan Force düktilite sonuçları incelendiğinde, +5 °C sıcaklıkta %0,5 oranında katkı maddesinin deney sonuçlarının saf bitüm ve diğer katkı oranlarının sonuçlarıyla karşılaştırıldığında en iyi sonucu verdiği gözlenmektedir. Yani +5 °C sıcaklıkta %0,5 oranında katkı maddesinin diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında bitümün gerilme performansını daha fazla arttırdığı ve uzama özelliklerini daha fazla geliştirdiği gözlenmiştir. +10 °C sıcaklıkta ise tüm numunelerin kopmadan deneyi başarıyla tamamladıkları gözlenmiştir.

Bayburt Üniversitesi Laboratuvarında yapılan DSR deney sonuçları incelendiğinde, %0,3 oranında katkı maddesinin deney sonuçlarının saf bitüm ve diğer katkı oranlarının sonuçlarıyla karşılaştırıldığında en iyi sonucu verdiği gözlenmektedir. Diğer bir deyişle saf bitümün elastik özelliğini iyileştirerek bitümün tekerlek izine karşı direncini en fazla arttıran katkı içeriğinin %0,3 olduğu tespit edilmiştir.

RV deney sonuçlarında, katkı maddesinin deneyin yapıldığı düşük sıcaklıklarda orijinal bitümün viskozite değerini arttırdığı buna rağmen deneyin yapıldığı yüksek sıcaklıklardaki orijinal bitümün viskozite değerini azalttığı görölmektedir. Orijinal bitümün 135 °C sıcaklıktaki viskozite değerleri katkı oranlarının hepsi için %9,09 oranında artarken, 165 °C sıcaklıktaki viskozite değerleri de %11,11 oranında azalmıştır. Viskozite değerinin düşük sıcaklıklarda artmasının sebebinin bitkisel yağ olan aspir yağının yapısından kaynaklandığı yapılan literatür araştırmalarına dayanarak söylenebilir. Ayrıca, katkılı bitüm numunelerinin karıştırma sıcaklık aralıklarında orijinal bitüme göre az bir miktar azalma olurken sıkıştırma sıcaklık aralığında değişim olmamıştır.

RTFOT deney sonuçlarında, yumuşama noktası sıcaklık farklarında katkı oranının artmasıyla azalma olduğu görölmüştür. Penetrasyon değeri ise katkı oranı arttıķça artmıştır. Katkı oranı arttıķça kütle kayıplarında azalma olduğu görölmüştür. Bu sayede asfalt kaplamaların üretimi ve servis sırasındaki yaşlanması azaltılması yönünde çok önemli bir katkı sağlamakta, kaplamanın daha uzun süre bozulmadan hizmet etmesi anlamına gelmektedir.

Yapılan deneylerin sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, katkının saf bitümün tekerlek izi ve yaşlanma direncini, işlenebilirliğini, gerilme performansını arttırdığı, uzama özelliklerini geliştirdiği, bunun yanı sıra sıcaklık hassasiyetini azalttığı tespit edilmiştir.

Farklı oranlarda aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesi ile üretilen modifiye bağlayıcılar üzerine yapılmış olan bu tez çalışması dikkate alınarak;

- Aspir yağı ve borik asit içerikli sentezlenen katkı maddesiyle modifiye edilen bitüm kullanılarak elde edilecek karışımın fiziksel ve mekanik özellikleri incelenebilir.
- Aspir yağı ve borik asit içerikli katkı maddesi farklı karıştırma sıcaklıklarında, farklı karıştırma sürelerinde ve farklı karıştırma hızlarında bitüme ilave edilebilir ve bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Aspir yağı, sertleştirici özelliği bulunan borik asit ve uzama kabiliyeti yüksek SBS polimeri ve benzeri polimerlerin birlikte kullanılmasıyla elde edilecek katkı maddesinin bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine bir çalışma yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Çeloğlu, M.E., Farklı Doğal Asflatların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014.
2. Yildirim, Y., Polymer Modified Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 21 (2007) 66-72.
3. Brovelli, C., Hilliou, L., Hemar, Y., Pais, J., Pereira, P. ve Crispino, M., Rheological Characteristic of EVA Modified Bitumen and Their Correlations with Bitumen Concrete Properties, Construction and Building Materials, 48 (2013) 1202-1208.
4. Airey, G. D., Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 16 (2002) 473-487.
5. Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 297 (2008) 4493-4507.
6. Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y. ve Wang, Y., Evaluation of the Improved Properties of SBR/ Weathered Coal Modified Bitumen Containing Carbon Black, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2678-2687.
7. Geçkil, T., Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
8. Lei, Z., Bahia, H. ve Yi-qiu, T., Effect of Bio-based and Refined Waste Oil Modifiers on Low Temperature Performance of Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 86 (2015) 95-100.
9. Su, J., Qiu, J., Schlangen, E. ve Wang, Y., Investigation the Possibility of a New Approach of Using Microcapsules Containing Waste Cooking Oil: In Situ Rejuvenation for Aged Bitumen, Construction and Building Materials, 74 (2015) 83-92.
10. Chen, M., Leng, B., Wu, S. ve Sang, Y., Physical, Chemical and Rheological Properties of Waste Edible Vegetable Oil Rejuvenated Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 66 (2014) 286-298.
11. Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24, 1-2 (2008) 227-240.
12. Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M. K., Improvement of Bitumen Performance with Epoxy Resin, Fuel, 88 (2009) 1324-1328.

13. Sengoz, B. ve Topal, A., Use of Asphalt Roofing Shingle Waste in HMA, Construction and Building Materials, 19 (2005) 337-346.
14. Bardesi A, et al., Use of Modified Bituminous Binders Special Bitumens and Bitumens with Additives in Pavement Applications, Technical Committee Flexible Roads (C8), World Road Association, 1999.
15. Diehl C. F., Ethylene –Styrene Interpolymers for Bitumen Modification, Second Eurasphalt Euro-bitume Congress, 2000, Barcelona, 93-102.
16. Yılmaz, B., Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
17. Dajue, L., Müdel, H., Safflower, Carthamus Tinctorius L, Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops, 7, Gatersleben / International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 1996.
18. Özek, K., Aspir Fosfolipitlerinin Fonksiyonel Yumurta Üretimi ve Yumurta Tavuklarında Yağlı Karaciğer Sendromunun Önlenmesindeki Etkileri, KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 19 (4), 399-406, 2016.
19. İşler, A., Aspir Yağı Etil Esteri ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
20. Yeşilçiçek, H., Kolemanitin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
21. www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-rezervleri. 15 Mayıs 2017.
22. Chaala, A., Roy, C. ve Ait-Kadi, A., Rheological Properties of Bitumen Modified with Pyrolytic Carbon Black, Fuel, 75,13 (1996) 1575-1583.
23. Lu, X., Isacson, U. ve Ekblad, J., Rheological Properties of SEBS, EVA and EBA Polymer Modified Bitumens, Materials and Structures, 32 (1999) 131-139.
24. Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacson, U., Rheological Effects of Commercial Waxes and Polyphosphoric Acid in Bitumen 160/220- Low Temperature Performance, Fuel, 85 (2006) 989-997.
25. Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacson, U., Effects of Commercial Waxes on Asphalt Concrete Mixtures Performance at Low and Medium Temperatures, Cold Regions Science and Technology, 45 (2006) 31-41.
26. Doğan, M., Effect of Polymer Additives on the Physical Properties of Bitumen Based Composites, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Bölümü, Ankara, 2006.

27. Metli, M., The Effect of SBS Based Polymer Modified Bitumen and Bituminous Mixtures on the Performance of Pavement, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İzmir, 2007.
28. Sengoz, B. ve Isikyakar, G., Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 22 (2008) 1897-1905.
29. Yılmaz, M. ve Kök, B. V., Stiren- Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 23, 4 (2008) 811-819.
30. Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M., Effect of Polyester Resin Additive on the Properties of Asphalt Binders and Mixtures, Construction and Building Materials, 22 (2008) 481-486.
31. Tasdemir, Y., High Temperature Properties of Wax Modified Binders and Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 23 (2009) 3220-3224.
32. Çolak, H., Öğütölmüş Araç Lastiğinin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
33. Demir, M., SBS, EVA ve Reaktif Terpolimer Kullanılarak Bitüm Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
34. Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M.K., Politetrafloretülen Bileşiğinin Bitümün Reolojik Özelliklerine Etkisi, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 26, 3 (2011) 623-630.
35. Ameri, M., Mansourian, A. ve Sheikhmotevali, A. H., Investigating Effects of Ethlyne Vinyl Acetate and Gilsonite Modifiers Upon Performance of Base Bitumen Using Superpave Tests Methodology, Construction and Building Materials, 36 (2012) 1001-1007.
36. Baldino, N., Gabriele, D., Rossi, C. O., Seta, L. ve Lupi, F. R., Low Temperature Rheology of Polyphosphoric Acid (PPA) Added Bitumen, Construction and Building Materials, 36 (2012) 592-596.
37. Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş. Ve Özen, H., SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkılarının Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması, İMO Teknik Dergi, 380 (2012) 5967-5986.
38. Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., Starostenko, O. ve Geçkil, T., Gamma Işıması ile Yüzey Aktivasyonu Yapılan Geri Dönüştürölmüş Yüksek Yoğunluklu Polietilen Katkılı Bitümlerin Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 307-317.

39. Khadivior, A. ve Kavussi, A., Rheological Characteristics of SBR and NR Polymer Modified Bitumen Emulsions at Average Pavement Temperatures, Construction and Building Materials, 47 (2013) 1099-1105.
40. Yılmaz, M., Kök, B.V., Alataş, T. ve Kuloğlu, N., Saf ve Modifiye Bitümlerle Hazırlanan Karışımların Kalıcı Deformasyonlara Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 32-39.
41. 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.
42. Köfteci, S., Ahmedzade, P. ve Kultayev, B., Performance Evaluation of Bitumen Modified by Various Types of Waste Plastics, Construction and Building Materials, 73 (2014) 592-602.
43. Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., Kultayev, B. ve Starostenko, O., Yüzey Aktivasyonlu Geri Dönüştürülmüş Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 29, 4 (2014) 807-816.
44. Khodaii, A., Nejad, F. M., Forough, S. A. ve Ahari, A.S., Investigating the Effects of Loading Frequency and Temperature on Moisture Sensitivity of SBS-Modified Asphalt Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 5 (2014) 897-903.
45. 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.
46. Sobolev, K., Vivian, I. F., Saha, R., Wasiuddin, N. M. ve Saltibus, N. E., The Effect of Fly Ash on the Rheological Properties of Bituminous Materials, Fuel, 116 (2014) 471-477.
47. Xiao, F., Amirkhanian, S., Wang, H. ve Hao, P., Rheological Property Investigations for Polymer and Polyphosphoric Acid Modified Asphalt Binders at High Temperatures, Construction and Building Materials, 64 (2014) 316-323.
48. Yan, K., Xu, H. ve You, L., Rheological Properties of Asphalts Modified by Waste Tire Rubber and Reclaimed Low Density Polyethylene, Construction and Building Materials, 83 (2015) 143-149.
49. Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J. ve Pereira, P., Using Polymers to Improve the Rutting Resistance of Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 77 (2015) 117-123.
50. Keyf, S., The Modification of Bitumen with Reactive Ethylene Terpolymer, Styrene Butadiene Styrene and Variable Amounts of Ethylene Vinyl Acetate, Research on Chemical Intermediates, 41, 3 (2015) 1485-1497.

51. 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.
52. Yilmaz, M. ve Yalcin, E., The Effects of Using Different Bitumen Modifiers and Hydrated Lime Together on the Properties of Hot Mix Asphalts, Road Materials and Pavement Design, 17, 2 (2016) 499-511.
53. Mubaraki, M., Ali, S.I.A., Ismail, A. ve Yusoff, N. I., Rheological Evaluation of Asphalt Cements Modified with ASA Polymer and Al₂O₃ Nanoparticles, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, September 2016, Guimaraes, Portugal, 1276-1284.
54. Hong-liang, Z., Man-man, S., Shi-feng, Z., Yong-ping, Z. ve Zeng-ping, Z., High and Low Temperature Properties of Nano-particles / Polymer Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 114 (2016) 323-332.
55. Bostancioglu, M. ve Oruç, S., Effect of Activated Carbon and Furan Resin on Asphalt Mixture Performance, Road Materials and Pavement Design, 17, 2 (2016) 512-525.
56. Bilondi, M. P., Marandi, S. M. ve Ghasemi, F., Effect of Recycled Glass Powder on Asphalt Concrete Modification, Structural Engineering and Mechanics, 59, 2 (2016) 373-385.
57. Rezaei, S., Ziari, H. ve Nowbakht, S., Low Temperature Functional Analysis of Bitumen Modified with Composite of Nano-SiO₂ and Styrene Butadiene Styrene Polymer, Petroleum Science and Technology, 34, 5 (2016) 415-421.
58. Rezaei, S., Ziari, H. ve Nowbakht, S., High-Temperature Functional Analysis of Bitumen Modified with Composite of Nano-SiO₂ and Styrene Butadiene Styrene Polymer, Petroleum Science and Technology, 34, 13 (2016) 1195-1203.
59. Imaninasab, R., Effect of Granular Polymer on Rutting Performance of SMA with Respect to Modification Process, Construction and Building Materials, 130 (2017) 64-72.
60. Yousefi, A. A., Ait-Kadi, A. ve Ray, C., Effect of Used-tire-derived Pyrolytic Oil Residue on the Properties of Polymer- Modified Asphalts, Fuel, 79, 8 (2000) 975-986.
61. Taşçı, A., Piroliz Edilmiş Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Atık Yağ ve Karbon Siyahı ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
62. Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M. ve Karim, M.R., Investigation on Physical Properties of Waste Cooking Oil- Rejuvenated Bitumen Binder, Construction and Building Materials, 37 (2012) 398-405.

63. Zargar, M., Ahmadinia, E., Asli, H. ve Karim, M. R., Investigation of the Possibility of Using Waste Cooking Oil as a Rejuvenating Agent for Aged Bitumen, Journal of Hazardous Materials, 223 (2012) 254-258.
64. Parvez, M. A., Wahhab, H. I. A., Shawabkeh, R. A. ve Hussein, I. A., Asphalt Modification Using Acid Treated Waste Oil Fly Ash, Construction and Building Materials, 70 (2014) 201-209.
65. Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B. ve Wu, S., High Temperature Properties of Rejuvenating Recovered Binder with Rejuvenator, Waste Cooking and Cotton Seed Oils, Construction and Building Materials, 59 (2014) 10-16.
66. Wang, F. L., Long, J., Shen, B. X. ve Ling, H., A Study of the Regenerating Effects of Recycling Agents on Aged Asphalts, Petroleum Science and Technology, 32, 10 (2014) 1160-1167.
67. Jia, X., Huang, B., Bowers, B. F. ve Zhao, S., Infrared Spectra and Rheological Properties of Asphalt Cement Containing Waste Engine Oil Residues, Construction and Building Materials, 50 (2014) 683-691.
68. Yang, X., You, Z., Dai, Q. ve Mills-Beale, J., Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Modified by Bio-oils Derived from Waste Wood Resources, Construction and Building Materials, 51 (2014) 424-431.
69. Aziz, M. M. A., Rahman, M. T., Hainin, M. R. ve Abu Bakar, W. A. W., An Overview on Alternative Binders for Flexible Pavement, Construction and Building Materials, 84 (2015) 315-319.
70. Maharaj, R. ve Maharaj, C., Physical Properties of Low Density Polyethylene, Polyvinylchloride and Used Engine Oil Modified Asphalt, Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology, 31, 3 (2015) 173-187.
71. Yang, X. ve You, Z., High Temperature Performance Evaluation of Bio-oil Modified Asphalt Binders Using the DSR and MSCR Tests, Construction and Building Materials, 76 (2015) 380-387.
72. Maharaj, R., Harry, V. ve Mohamed, N., The Rheological Properties of Trinidad Asphaltic Materials Blended with Waste Cooking Oil, Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology, 31, 4 (2015) 265-279.
73. Garcia, A., Austin, C. J. ve Jelfs, J., Mechanical Properties of Asphalt Mixture Containing Sunflower Oil Capsules, Journal of Cleaner Production, 118 (2016) 124-132.
74. Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B. ve Kringos, N., An Extensive Laboratory Investigation of the Use of Bio-oil Modified Bitumen in Road Construction, Construction and Building Materials, 106 (2016) 133-139.

75. Lei, Z., Yi-qiu, T. ve Bahia, H., Relationship Between Glass Transition Temperature Properties of Oil Modified Binders, Construction and Building Materials, 104 (2016) 92-98.
76. Zabelkin, S., Grachev, A., Fayzrakhmanova, G., Makarov, A. ve Bashkirov, V., Application of the Water-insoluble Pyrolysis Oil Fraction as an Organic Binder, Construction and Building Materials, 102 (2016) 59-64.
77. Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D. ve Guo, C., Properties of Asphalt Binder Modified by Bio-oil Derived From Waste Cooking Oil, Construction and Building Materials, 102 (2016) 496-504.
78. Gong, M., Yang, J., Zhang, J., Zhu, H. ve Tong, T., Physical-Chemical Properties of Aged Asphalt Rejuvenated by Bio-oil Derived from Biodiesel Residue, Construction and Building Materials, 105 (2016) 35-45.
79. Lentz, A. P., Asphaltic Compound, United States Patent Office, Patent No: 2375117, 1945.
80. Doyle, P. C. , River, R., Hook, E. O., Falls, C. ve Hardman, H. F., Asphaltic Cement, United States Patent Office, Patent No: 3094427, 1963.
81. Marzocchi, A., Roberts, G. M. ve Bolen, C. E., Boron Modified Asphalts, United States Patent Office, Patent No: 4360473, 1982.
82. 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.
83. Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Bostancıoğlu, M., Borik Asitin Asfaltın Fiziksel Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 297-306.
84. Terzi, S., Morova, N., Çolak, N., Serin, S., Saltan, M., Kulemanit Atıklarının Asfalt Beton Karışımlarda Filler Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, 10. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Eylül 2013, İzmir, 449-457.
85. 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.
86. Selman, G. Ş., Bor Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015.
87. 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.

88. 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.
89. 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.
90. Wang, D. C., Chang, G. W. ve Chen, Y., Preparation and Thermal Stability of Boron- Containing Phenolic Resin /Clay Nanocomposites, Polymer Degradation and Stability, 93, 1 (2008) 125-133.
91. Martin, C., Hunt, B. J., Ebdon, J. C., Ronda, J. C. ve Cadiz, V., Synthesis Crosslinking and Flame Retardance of Polymers of Boron-Containing Difunctional Styrenic Monomers, Reactive and Functional Polymers, 66, 10 (2006) 1047-1054.
92. Gao, J., Su, X. ve Xia, L., Synthesis and Structure Characterization of Boron-Nitrogen Containing Phenol Formaldehyde Resin, International Journal Polymer Materials, 54, 10 (2005) 949-961.
93. Gao, J., Liu, Y. ve Wang, F., Structure and Properties of Boron-Containing Bisphenol- A Formaldehyde Resin, European Polymer Journal, 37, 1 (2001) 207-210.
94. Martin, C., Ronda, J. C. ve Cadiz, V., Boron-Containing Novolac Resins as Flame Retardant Materials, Polymer Degradation and Stability, 91, 4 (2006) 747-754.
95. Uslu, I., Dastan, H., Altas, A., Yayli, A., Atakol, O. ve Aksu, M. L., Preparation and Characterization of PVA/Boron Polymer Produced by an Electrospinning Technique, e-polymers, 133, 1 (2007).
96. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayın, No:1, İstanbul, 2001.
97. Orhan, F., Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2012.
98. Whiteoak, D., Shell Bitüm El Kitabı, Lav, A. H. ve Lav, A., İSFALT Bilimsel Yayınları No:3 , İstanbul, 2004.
99. Tunç, A., Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
100. Balta, İ., Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2004.
101. Sybilski, D., Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens and Rutting Resistance of Pavement, Material and Structures, 27 (1994) 110-120.

102. 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.
103. McKay, J. R., Amend, P. J., Cogswell, T. E., Harnsberger, P.M., Erickson, R. B. ve Latham, D. R., Petroleum Asphaltenes: Chemistry and Composition, ACS Advances in Chemistry Series No:170, Chapter: 9.
104. Kök, B. V., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, C.Ü. Fen- Edebiyat Fakültesi, Fen Bilimleri Dergisi, 30, 1, 2009.
105. TS 118, EN 1426, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
106. Oruç, Ş., Yoğun Granülometrilili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
107. Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A. ve Gökçe, A.F., Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1990.
108. TS 120 EN 1427, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar- Yumuşama Noktası Tayini- Halka ve Bilya Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
109. Hadavand, B.S., Bitumen Modification with Polysulphide Polymer Prepared from Heavy end Waste, Iranian Polymer Journal, 19, 5 (2010) 363-373.
110. TS EN 13398, Bitümlü Maddelerin Düktülite Deneyi İçin Metod, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
111. TS EN 13589, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - İşlem Görmüş Bitümlerin Çekme Özelliklerinin Düktilometre Metoduyla Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
112. Lav, A., Bitümlü Bağlayıcılar (Türleri, Temel Özellikleri, Yapıları, Uygulanan Deneyler ve İlgili Şartnameler), 106. Eğitim Semineri Asfalt Günleri, Konya, 2007.
113. Atasagun, N., Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Çörekotu Küspesi ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.
114. TS 1090 EN 12592, Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar- Çözünürlük Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
115. Çubuk, M., Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.

116. Yılmaz, M. ve Ahmedzade, P., Saf ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Kısa Dönem Yaşlanmadan Sonraki Özelliklerinin İki Farklı Yaşlandırma Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 23, 3 (2008) 569-575.
117. TS EN 12607-1, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar- Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
118. Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W., Anderson, M., The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research 119, Council, Washington, DC, 184p, 1994.
119. The Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), 120, U.S.A., 100p, 1996.
120. Zaniewski, J. P. ve Pumphrey, M. E., Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 2004.
121. Zaniewski, J. P. ve Nallamothu, S. H., Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia, 76p, 2003.
122. 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.
123. Arslan, D., Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal ve Polibor Katkı Maddeleriyle Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
124. Yılmaz, M., Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2011.
125. Geçkil, T., Alataş, T. ve Ahmedzade, P., Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27,1 (2011) 88-106.
126. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2007.
127. Dinç, E., Performans Sınıfı Asfaltlar- Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C. Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 11, 17-35, 128, 1999.
128. Lavin, P. G., Asphalt Pavement, Spon Press, London and New York, 2, 8, 21-27, 188, 2003.
129. Jun, L., Yuxia, Z. ve Yuzhen, Z., The Research of GMA-g-LDPE Modified Qinhuangdao Bitumen, Construction and Building Materials, 22, 6 (2008) 1067-1073.

130. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul, 2001.
131. Geçkil, A., Öğütülmüş Araç Lastiğinin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Düşük Sıcaklık ve Elastik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2013.
132. Altaş, Ö.Y., Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
133. Petersen, J. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., et. Al., Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 19p, 1994.
134. Birliker, R. Y., Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar İle Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
135. Yalçın, H. ve Gürü, M., Malzeme Bilgisi, 1. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 2002.
136. Girdap, E., Taş Mastik Asfalt Karışımlarda SBS ile birlikte PR plast S katkısının karışım performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
137. Kayahan, M., Yağ Kimyası, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2003, 125s.
138. Karaca, E. ve S, Aytaç., Yağ Bitkilerinde Yağ Asitleri Kompozisyonu Üzerine Etki Eden Faktörler, OMÜ, Ziraat Fakültesi Dergisi, 22 (2007) 123-131.
139. Karabaş, H., Soğuk Press ve Solvent Ekstraksiyon Teknikleri ile Üretilen Aspir Yağı ve Aspir Biyodizellerinin Yağ ve Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi, 28. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi, Eylül 2013, Konya.
140. Singh, V., Nimbkar, N. ve Rajvanshi, A.K., Safflower Improvement Programme at the Nimbkar Agricultural Research Institute, Proceedings 5th International Safflower Conference, July 2001, pp. 117-121, USA.
141. Cao, S., Zhu1, Q.H., Shen, W., Jiao, X., Zhao, X., Wang, M.B., Liu, L., Singh, S.P. ve Liu,Q., Comparative profiling of miRNA expressionin developing seeds of high linoleic and high oleic safflower (*Carthamus tinctorius* L.) plants, *Frontiersin Plant Science*, (2013), Doi: 10.3389/fpls.2013.00489
142. Singh, V. ve Nimbkar, N., Safflower (*Carthamus tinctorius* L.), Genetic resources, chromosome engineering and crop improvement: Oilseed Crops, CRC Press, 4, 6 (2006) 167-194 pp.

143. Kızıldaş, S., Aspir Yağı ve Türevlerinin in vitro Proapoptotik ve Mutajenik Etkilerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2014.
144. Aydın, S., Aspir Yağından Biyo- Yakıt Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat, 2010.
145. Babaoğlu, M., Dünya’da ve Türkiye’de Aspir Bitkisinin Tarihi, Kullanım Alanları ve Önemi, Broşür, Trakya Tarımsal Araştırmalar Enstitüsü, Edirne, 2006.
146. Akınerdem, F. ve Öztürk, Ö., Safflower and Biodiesel quality in Turkey , 7. International Safflower Conference, Australian Oilseeds Federation, Wagga Wagga, Australia, 2008.
147. İlkdoğan, U., Türkiye’de Aspir Üretimi İçin Gerekli Koşullar ve Oluşturulacak Politikalar, Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, 2012.
148. İşler, N., Aspir Tarımı, M.K.Ü. Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü
149. www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi. 15 Mayıs 2017.
150. www.etimaden.gov.tr/tr/page/diger-kullanim-alanlari. 15 Mayıs 2017.
151. Garret D.E., Borates, Academic Press, California, 1998.
152. www.tubitak.gov.tr. TÜBİTAK Bor Raporu. 11 Şubat 2016.
153. www.maden.org.tr/resimler/ekler/d34d468ac887633_ek.pdf. 12 Ocak 2016.
154. www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-mineralleri. 15 Mayıs 2017.
155. www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-uretimi. 15 Mayıs 2017.
156. www.etimaden.gov.tr/tr/page/uretim-turkiye-bor-rezervleri. 15 Mayıs 2017.
157. Anonim, 2010 Yılı Bor Sektör Raporu, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.
158. <http://tr.m.wikipedia.org>. Bor, Kullanım Yerleri. 12 Şubat 2016.
159. www.nanokon.yildiz.edu.tr/nanoteknoloji/taramali-elektron-mikroskobu-scanning-elektron-microscope-sem/. 15 Mayıs 2017.
160. www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/ftir. 15 Mayıs 2017.
161. www.etimaden.gov.tr/files/files/document/borik-asit.pdf. 02 Ağustos 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Demet ŞAHİN, 1991 yılında İstanbul'da doğdu. 2005 yılında Yıldırım Beyazıt İlköğretim okulundan, 2009 yılında Gülizar Zeki Obdan Lisesinden mezun oldu. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2014 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki lisans eğitimini bölüm üçüncülüğü ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. Mezun olduktan sonra 2016 yılına kadar yapı denetim firmalarında kontrol elemanı olarak çalıştı. 2016 yılında Kaynarca- Sabiha Gökçen Metro İnşaatında Gülermak YSE Adi Ortaklığı adlı şirkette Kalite Kontrol Şefi olarak görev yaptı. 2017 yılında İstanbul ili Tuzla Belediye'si İmar ve Şehircilik Müdürlüğü'nde çalışmaya başladı.

Halen Tuzla Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü'nde görev yapmakta olan Demet ŞAHİN ileri derece İngilizce bilmektedir.