

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**BİTKİSEL ATIK YAĞ İLAVESİYLE REAKTİF POLİMER VE
POLİFOSFORİK ASİT MODİFİYELİ BİTÜMÜN, DÜŞÜK
SICAKLIK PERFORMANSININ VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Aytuğ KUMANDAŞ

Danışman
Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR

II. Danışman
Prof. Dr. Şeref ORUÇ

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Aytuğ KUMANDAŞ tarafından Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR danışmanlığında hazırlanan “Bitkisel Atık Yağ İlavesiyle Reaktif Polimer ve Polifosforik Asit Modifiyeli Bitümün, Düşük Sıcaklık Performansının ve İşlenebilirliğinin Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 20.05.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı, Adı/Soyadı Üniversitesi Ana Bilim Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Baha Vural KÖK	<input checked="" type="checkbox"/>	Kabul
	Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	<input type="checkbox"/>	Ret
Üye (Danışman)	Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR	<input checked="" type="checkbox"/>	Kabul
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	<input type="checkbox"/>	Ret
Üye	Doç. Dr. Ufuk KIRBAŞ	<input checked="" type="checkbox"/>	Kabul
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	<input type="checkbox"/>	Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY
... / ... / 2021
Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

16 / 04 / 2021
Aytuğ KUMANDAŞ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Bitkisel Atık Yağ İlavesiyle Reaktif Polimer ve Polifosforik Asit Modifiyeli Bitümün, Düşük Sıcaklık Performansının ve İşlenebilirliğinin Geliştirilmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 16.04.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

16 / 04 / 2021
Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR

ÖZET

BİTKİSEL ATIK YAĞ İLAVESİYLE REAKTİF POLİMER VE POLİFOSFORİK ASİT MODİFİYELİ BİTÜMÜN, DÜŞÜK SICAKLIK PERFORMANSININ VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Aytuğ KUMANDAŞ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, 05/2021

Danışman: Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR

Bu tez çalışmasında, Reaktif Etilen Terpolimer (RET) ve Polifosforik Asit (PPA) ile modifiye edilmiş 50/70 penetrasyonlu bitüme farklı oranlarda bitkisel atık yağ ilave edilerek RET modifiyeli bitümün işlenebilirliğinin ve düşük sıcaklıklardaki performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, %1.5 RET ve %0.2 PPA modifiyeli bitüme %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilave edilerek fiziksel, reolojik ve kimyasal özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Modifiyeli bitümlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde, Penetrasyon, Yumuşama Noktası, Nicholson Soyulma, Kuvvet Ölçümlü Düktilite, Özgül Ağırlık, Trikloretilende Çözünürlük Deneyleri gibi geleneksel deneylerden faydalanılırken reolojik özelliklerinin belirlenmesinde Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO), Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV), Dönel Viskozite (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR) ve Eğme Kirişi Reometresi (BBR) deneylerinden yararlanılmıştır. Modifiyeli bitümlerin kimyasal yapılarının analizlerinde ise Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Termogravimetrik Analizden (TGA) faydalanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, çalışmanın amacına uygun olarak RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesinin RET modifiyeli bitümün işlenebilirliğini ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncini arttırdığı belirlenmiştir. Bu durumda, RET modifiyeli bitümlere bitkisel atık yağ ilavesinin, RET modifiyeli bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürerek enerji tasarrufu sağlayabileceği ve çevreye verilen zararı azaltabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, RET modifiyeli bitümün düşük sıcaklık performansındaki artış sayesinde hazırlanan kompozit modifiyeli bitüm soğuk iklimli bölgelerde de kullanılabilir hale gelmiştir. Bu sonuçlarla birlikte, bitkisel atık yağ ilavesinin RET modifiyeli bitümün tekerlek izi direncini azalttığı ulaşılan bir diğer sonuçtur.

Anahtar Sözcükler: Modifiyeli bitüm, Reaktif etilen terpolimer, Bitüm, Bitkisel atık yağ, Kompozit modifikasyon

ABSTRACT

IMPROVING LOW TEMPERATURE PERFORMANCE AND WORKABILITY OF REACTIVE POLYMER AND POLYPHOSPHORIC ACID MODIFIED BITUMEN BY ADDING VEGETABLE WASTE OIL

Aytuğ KUMANDAŞ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Master, 05/2021

Supervisor: Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR

In this thesis, it was aimed to increase the workability, and low-temperature performance of RET modified bitumen by adding different proportions of waste vegetable oil to the 50/70 penetration grade bitumen modified with Reactive Ethylene Terpolymer (RET) and Polyphosphoric Acid (PPA). Accordingly, 2%, 4%, 6%, 8% of waste vegetable oil was added to 1.5% RET and 0.02% PPA modified bitumen, and changes in physical, rheological, and chemical properties were investigated. While traditional tests such as Penetration, Softening Point, Nicholson Stripping, Force Ductility, Specific Gravity, Solubility in Trichlorethylene tests were used to determine the physical properties of modified bitumens, Rolling Thin Film Oven (RTFO), Pressure Aging Vessel (PAV), Rotational Viscosity (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Bending Beam Rheometer (BBR) tests were used to determine their rheological properties. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and Thermogravimetric Analysis (TGA) were used to analyze the chemical structure of modified bitumens. As a result of the experiments, it was determined that adding waste vegetable oil to RET modified bitumen, under the purpose of the study, increased the workability of RET modified bitumen and its resistance to low-temperature cracks. In this case, it was concluded that adding waste vegetable oil to RET modified bitumen can reduce the mixing and compression temperatures of RET modified bitumen, thereby saving energy and reducing the damage to the environment. Besides, thanks to the increase in low-temperature performance of RET modified bitumen, the prepared composite modified bitumen has become usable in regions with cold climates. Along with these results, it is concluded that vegetable waste oil reduces the rutting resistance of RET modified bitumen.

Keywords: Modified bitumen, Reactive ethylene terpolymer, Bitumen, Waste vegetable oil, Composite modification

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, OMÜ-BAP PYO.MUH.1904.20.009 numaralı “Bitkisel Atık Yağ İlavesiyle Reaktif Polimer ve Polifosforik Asit Modifiyeli Bitümün, Düşük Sıcaklık Performansının ve İşlenebilirliğinin Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında yürütülmüştür. Maddi desteklerinden dolayı OMÜ-BAP birimine içtenlikle teşekkür ederim.

Yüksek lisans danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarımın yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen her daim yanımda olan kıymetli hocam Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR’a sonsuz teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Aynı şekilde, bu tez kapsamında ikinci danışmanlığımı üstlenen ve lisans eğitimimin ortasından itibaren benim bir akademisyen olma yolunda yürümeme vesile olan saygı değer hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ’a saygılarımı sunar ve teşekkür ederim.

Bu tezin yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında özellikle laboratuvar ortamında yapılan çalışmalardaki desteği sebebiyle saygı değer hocam sayın Prof. Dr. Baha Vural KÖK’e teşekkürü borç bilir ve saygılarımı sunarım.

Tez kapsamında kullandığım katkı malzemesinin temininde çaba sarf eden ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen saygı değer hocam Doç. Dr. Ufuk KIRBAŞ’a emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezim süresince hem laboratuvar çalışmalarına verdikleri destekler hem de motivasyon sebebiyle meslektaşlarım Arş. Gör. Erman ÇAVDAR’a ve Arş. Gör. Merve Gülfer BOZDEMİR’e teşekkürü borç bilirim. Bu süreç içerisinde her zaman yanımda olan mesai arkadaşlarım, ağabeylerim, hocalarım, Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN’a, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih YILMAZ’a, Arş. Gör. Dr. M. Kerem ERTEK’e, Dr. Ferruh TURAN’a, Arş. Gör. Muhammed Fatih BAŞOĞLU’na, Arş. Gör. Utku KÖKTAN’a ve Arş. Gör. Cenk SEZEN’e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olan, bugünlere gelmem için özenle çaba gösteren, maddi ve manevi tüm desteğiyle arkamda duran değerli ailem, babam Cemallettin KUMANDAŞ, annem Fatma KUMANDAŞ ve ablam Melike BOZKURT’a minnet ve teşekkürlerimi sunar ve sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışması; “Bir kalp krizi sonrası hayatını kaybeden babam Cemalettin KUMANDAŞ anısınadır...”

Aytuğ KUMANDAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. Karayolu Üstyapıları.....	4
2.1.1. Rijit Üstyapılar	4
2.1.2. Esnek Üstyapılar.....	5
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK).....	7
2.2.1. BSK'ların Özellikleri.....	8
2.2.2. BSK'larda Meydana Gelen Bozulmalar	15
2.3. Bitüm	28
2.3.1. Bitümün Kimyası	29
2.3.2. Bitümün Reolojisi.....	33
2.4. Bitüm Modifikasyonu.....	39
2.4.1. Tarihsel Açıdan Polimerlerle Bitüm Modifikasyonu	40
2.4.2. Yaygın Olarak Kullanılan Polimer Katkı Malzemeleri	42
2.4.3. Reaktif Etilen Terpolimeri ve Polifosforik Asit	45
2.4.4. Bitkisel Atık Yağ.....	48
2.5. Kaynak Özetleri	50
2.5.1. Reaktif Etilen Terpolimerleri ile İlgili Çalışmalar	51
2.5.2. Bitkisel Atık Yağlar ile İlgili Çalışmalar.....	64
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	74
3.1. Modifiyeli Bitüm Numunelerinin Hazırlanması.....	75
3.2. Modifiyeli Bitümlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	81
3.2.1. Penetrasyon Deneyi.....	81
3.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi.....	83
3.2.3. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi.....	85
3.2.4. Elastik Geri Kazanım Deneyi.....	87
3.2.5. Yanma ve Parlama Noktası Deneyi.....	89
3.2.6. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi.....	91
3.2.7. Nicholson Soyulma Deneyi.....	93
3.2.8. Özgül Ağırlık Deneyi	95
3.3. Modifiyeli Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....	97
3.3.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO) Deneyi.....	97
3.3.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi.....	99
3.3.3. Dönel Viskozite (RV) Deneyi	102
3.3.4. Dinamik Kayme Reometresi (DSR) Deneyi	104
3.3.5. Eğme Kirişi Reometresi (BBR) Deneyi	107
3.4. Modifiyeli Bitümlerin Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi	110
3.4.1. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)	110
3.4.2. Termogravimetrik Analiz (TG)	111
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	113
4.1. Fiziksel Özellikler ile İlgili Bulgular	113
4.1.1. Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	113
4.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	114
4.1.3. Penetrasyon İndeksleri.....	114
4.1.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi Sonuçları	116
4.1.5. Elastik Geri Kazanım Deneyi Sonuçları.....	117

4.1.6. Yanma ve Parlama Noktası Deneyi Sonuçları	118
4.1.7. Trikloretilede Çözünürlük Deneyi Sonuçları	120
4.1.8. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.....	120
4.1.9. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	122
4.2. Reolojik Özellikler ile İlgili Bulgular.....	122
4.2.1. RV Deneyi Sonuçları.....	122
4.2.2. RTFO Deneyi Sonuçları	127
4.2.3. DSR Deneyi Sonuçları	132
4.2.4. BBR Deneyi Sonuçları	137
4.2.5. Performans Sınıflandırmaları	140
4.3. Kimyasal Özellikler ile İlgili Bulgular	147
4.3.1. FT-IR Sonuçları.....	147
4.3.2. TG/DTG Sonuçları	149
5. SONUÇ	151
6. KAYNAKLAR	155

SİMGELER VE KISALTMALAR

AFM	: Atomik kuvvet mikroskopisi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BBR	: Eğme Kirişi Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DENT	: İki kenar çentikli gerilme
DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetresi
DSR	: Dinamik Kayma Reometresi
EBA	: Etilen bütül akrilat
EPDM	: Etilen-probilen-dien terpolimer
EVA	: Etilen-vinil asetat
FI	: Esneklik indeksi
FT-IR	: Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi
G*	: Kompleks kayma modülü, Pa
G'	: Kayma depolama modülü, Pa
G''	: Kayma kayıp modülü, Pa
GWR	: Öğütülmüş atık kauçuk
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HSR	: Yüksek kesme oranı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LAS	: Doğrusal genlik taraması
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
M _R	: Esneklik modülü
MSCR	: Çoklu Gerilmeli Sünme-Geri Kazanım, <i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PE	: Polietilen
PI	: Penetrasyon indeksi
PMB	: Polimer Modifiyeli Bitüm
PPA	: Polifosforik Asit
PUP	: Poliüretan prepolimeri
RAP	: Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama
RET	: Reaktif Etilen Terpolimer
RTFO	: Dönel İnce Film Halinde Isıtma
RV	: Dönel Viskozite
SARA	: Doymuş hidrokarbonlar, Asfaltenler, Reçineler, Aromatikler
SBR	: Stiren-bütadien kauçuğu
SBS	: Stiren-bütadien-stiren

SEBS	: Stiren-etilen/bütülen-stiren
SHRP	: Stratejik karayolu araştırma programı
SIS	: Stiren-izopren-stiren
SSF	: Durgun hal akması
Superpave	: Üstün performanslı asfalt kaplamalar, <i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TDK	: Türk Dil Kurumu
TFO	: İnce film halinde ısıtma
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
WMA	: Ilık asfalt katkı malzemesi
ZSV	: Sıfır kesme viskozitesi
δ	: Faz açısı, °
τ	: Kayma mukavemeti
ϕ	: İçsel sürtünme açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Temsili rijit üstyapı görünümü (Kök, 2019)	4
Şekil 2.2.	Temsili esnek üstyapı görünümü (Kök, 2019)	5
Şekil 2.3.	BSK tabakaları	7
Şekil 2.4.	Kaplamada tekerlek izi (Line.17qq, 2021).....	16
Şekil 2.5.	Tekerlek izi tipleri: (A) yapısal tekerlek izi, (B) akma tekerlek izi ve (C) aşınma ve oturma tekerlek izi (Kutluhan ve Açar, 2009)	17
Şekil 2.6.	Kaplamada (a) oturma ve (b) çökme (Yılmaz, 2016)	18
Şekil 2.7.	Kaplamada ondülasyon ve yığılma (Bisantiye, 2021)	19
Şekil 2.8.	Kaplamada kabarma (IDEA, 2021)	20
Şekil 2.9.	Kaplamada sökülme (PavementInteractive, 2021d).....	21
Şekil 2.10.	Kaplamada çukur (PavementInteractive, 2021c)	21
Şekil 2.11.	Kaplamada kuma-terleme (PavementInteractive, 2021a).....	22
Şekil 2.12.	Kaplamada timsah sırtı çatlaklar (RocciesAsphalt, 2021)	23
Şekil 2.13.	Kaplamada kenar çatlakları.....	24
Şekil 2.14.	Kaplamada derz çatlağı (PavementInteractive, 2021b).....	24
Şekil 2.15.	Kaplamada kayma çatlağı (PavementInteractive, 2021f).....	25
Şekil 2.16.	Kaplamada yansıma çatlağı (PavementInteractive, 2021e)	25
Şekil 2.17.	Kaplamada düşük sıcaklık çatlağı (Minnesota DOT, 2021)	26
Şekil 2.18.	Ham petrol damıtma işleminin şematik gösterimi (Hunter vd, 2015).....	28
Şekil 2.19.	SARA fraksiyonları	30
Şekil 2.20.	Bitümün SARA fraksiyonlarına ayrılmasında izlenen yol (Hunter vd, 2015)	31
Şekil 2.21.	Sol-tipi bitüm yapısı (Hunter vd, 2015)	32
Şekil 2.22.	Jel tipi bitümün yapısı (Hunter vd, 2015)	33
Şekil 2.23.	Bitümün akma davranışı (McGennis vd, 1994)	35
Şekil 2.24.	Viskoelastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı (Hunter vd, 2015)	35
Şekil 2.25.	Gerilme tepkisi ve şekil değiştirme ilişkisi (Hunter vd, 2015).....	36
Şekil 2.26.	Bitümün viskoelastik davranışı	37
Şekil 2.27.	Bitümün reolojisinde faz açısının önemi (McGennis vd, 1994)	38
Şekil 2.28.	G^* ile G' ve G'' arasındaki ilişki (Hunter vd, 2015)	38
Şekil 2.29.	Reaktif etilen terpolimerin kimyasal yapısı (de Sá Araujo vd, 2013)	46
Şekil 2.30.	PPA'nın kimyasal yapısı (de Sá Araujo vd, 2013)	48
Şekil 2.31.	Yıllar bazında dünya geneli türlerine göre bitkisel yağ tüketimi (Statista, 2021).	49
Şekil 2.32.	Tipik bir trigliserid molekülünün yapısı (Srivastava ve Prasad, 2000)	50
Şekil 3.1.	Kırıkkale petrol rafinerisinde üretilmiş 50/70 penetrasyon sınıflı saf bitüm numunesi	75
Şekil 3.2.	Elvaloy RET 5160	76
Şekil 3.3.	PPA	76
Şekil 3.4.	Filtrelenmiş bikisel atık yağ.....	77
Şekil 3.5.	Mekanik karıştırıcı ile modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanması	78

Şekil 3.6.	Penetrasyon cihazı (penetrometre).....	81
Şekil 3.7.	25°C'lik su banyosundaki bitüm numunesi dolu penetrasyon kapları ve taşıma kabı	82
Şekil 3.8.	Bir ışık kaynağı yardımı ile iğne ucunun numune yüzeyine temasının belirlenmesi ..	82
Şekil 3.9.	Yumuşama noktası deney aparatı	83
Şekil 3.10.	(a) bitüm doldurulmuş yüzükler (b) yüzükten taşan kısım (c) traşlama sonrası	84
Şekil 3.11.	Bitüm numunesinin alt levhaya temas ettiği an	84
Şekil 3.12.	Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı.....	85
Şekil 3.13.	(A) Düktilite kalıbı (B) düktilite kalıbına bitüm dökümü (C) bitüm ile doldurulmuş düktilite kalıpları.....	86
Şekil 3.14.	(A) Tıraşlamadan önce kalıp yüzeyi (B) Tıraşlama işlemi (C) Tıraşlamadan sonra kalıp yüzeyi.....	86
Şekil 3.15.	Sabit hızdaki çekme kuvveti etkisi altında bitüm numunesi	87
Şekil 3.16.	(A) 10cm çekilmiş numuneler (B) makas yardımıyla numunelerin kesilmesi (C) 1 saatlik süre sonrasında numunelerin durumu	88
Şekil 3.17.	Cleveland açık kabı.....	89
Şekil 3.18.	Sınır çizgisine kadar bitüm doldurulmuş deney seti	90
Şekil 3.19.	(A) Parlamanın meydana geldiği an (B) Yanmanın başladığı an.....	91
Şekil 3.20.	Trikloretilende çözünürlük deneyi için kullanılan teçhizat	91
Şekil 3.21.	(A) Düzeneğe yerleştirilmiş filtre kâğıdı (B) Filtre kâğıdı üzerinde vakum cihazı yardımıyla süzdürülen bitüm ve trikloretilen karışımı	93
Şekil 3.22.	(A) 9.5 – 4.75 mm'lik elekler arasında kalan yıkanmış agregası (B) agregaların etüvde kurutulması (C) agregalardan yaklaşık 100 gr alınması (D) 100 gr agregaya yaklaşık 5 gr bitüm ilavesi	94
Şekil 3.23.	(A) Petri kabına aktarılmış bitüm ve agregası karışımı (B) Koşullandırmaya hazır hale getirilmiş numune	94
Şekil 3.24.	Su banyosuna yerleştirilmiş saf su dolu piknometreler.....	95
Şekil 3.25.	(A) Kapak dâhil piknometre, (B) saf su dolu piknometre, (C) yarısı bitüm dolu piknometre, (D) bitüm ve saf su dolu piknometre	97
Şekil 3.26.	Dönel ince film halinde ısıtma fırınının dıştan ve içten görünüşleri	98
Şekil 3.27.	Sırasıyla; boş, 35 gr bitüm dolu ve deney sonrası RTFO kapları.....	99
Şekil 3.28.	(A) PAV cihazı, (B) Vakum fırını	100
Şekil 3.29.	(A) RTFO kaplarından PAV kaplarına numune aktarımı (B) PAV kaplarının numune rafına yerleştirilmesi (C) numune rafının PAV cihazına yerleştirilmesi (D) PAV sonrası numunelerin farklı kaplara aktarılması (E) Numunelerin vakum fırınına yerleştirilmesi (F) Vakum fırınında numunelerde kalan hava boşluklarının giderilmesi	101
Şekil 3.30.	RV cihazı ve termosel.....	102
Şekil 3.31.	RV tüplerine bitüm doldurma işlemi	103
Şekil 3.32.	DSR cihazı	104
Şekil 3.33.	DSR cihazının plakaları ve bir salınım döngüsü.....	105
Şekil 3.34.	DSR'ye yerleştirilmesi gereken numune miktarı (McGennis vd, 1994).....	106
Şekil 3.35.	Manuel yöntemle sünme rijitliğinin hesaplanması (McGennis vd, 1994)	108
Şekil 3.36.	Manuel yöntemle m-değerinin hesaplanması (McGennis vd, 1994).....	109
Şekil 3.37.	BBR numune kalıbı ve deney için hazırlanan numuneler.....	110

Şekil 3.38.	Bruker Tensor 27 model FT-IR cihazı	111
Şekil 3.39.	TA Instruments Q600 SDT model TG analizi cihazı.....	112
Şekil 4.1.	Penetrasyon deneyi sonuçları.....	113
Şekil 4.2.	Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	114
Şekil 4.3.	Penetrasyon indeksleri (PI)	115
Şekil 4.4.	Düktilite sonuçları.....	116
Şekil 4.5.	Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi sonuçları	117
Şekil 4.6.	Elastik geri kazanım deneyi sonuçları	118
Şekil 4.7.	Parlama noktası deneyi sonuçları.....	119
Şekil 4.8.	Yanma noktası deneyi sonuçları	119
Şekil 4.9.	Parlama ve yanma noktası deneyleri sonuçları	119
Şekil 4.10.	Trikloretilende çözünürlük deneyi sonuçları	120
Şekil 4.11.	Nicholson soyulma deneyi sonuçları	121
Şekil 4.12.	Nihcolson soyulma deneyi sonrası hazırlanan numunelerin görüntüleri	121
Şekil 4.13.	Özgül ağırlık deneyi sonuçları	122
Şekil 4.14.	135 °C'sıcaklıkta #21 numaralı mil ile gerçekleştirilen RV deneylerine ait sonuçlar	123
Şekil 4.15.	#21 numaralı mil ile 120, 135, 165, 180 °C sıcaklıklarda yapılan RV sonuçları	124
Şekil 4.16.	170±20 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar ile belirlenen karıştırma sıcaklıkları. 125	
Şekil 4.17.	280±300 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar ile belirlenen sıkıştırma sıcaklıkları 125	
Şekil 4.18.	Numunelere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	125
Şekil 4.19.	#29 numaralı mil ile yürütülen RV deneylerine ait sonuçlar	127
Şekil 4.20.	#29 numaralı mil ile yürütlen RV deneylerine ait değerler (logaritmik eksen üzerinde)	127
Şekil 4.21.	RTFO deneyi sonrası kütle kayıpları	128
Şekil 4.22.	RTFO deneyi öncesi ve sonrasında numunelere ait penetrasyon değerleri.....	129
Şekil 4.23.	Kalıcı penetrasyon yüzdeleri.....	130
Şekil 4.24.	RTFO deneyi öncesi ve sonrası 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri.....	131
Şekil 4.25.	135°C sıcaklıkta yürütülen RV deneyleri sonucunda elde edilen yaşlanma indeksleri	131
Şekil 4.26.	Kompleks kayma modülleri (G*)	133
Şekil 4.27.	Faz açıları (°)	134
Şekil 4.28.	Tekerlek izi parametreleri (G*/sinδ).....	135
Şekil 4.29.	Sütun grafiğinde gösterilmiş tekerlek izi parametreleri	136
Şekil 4.30.	PAV ile yaşlandırılmış numunelere ait G*/sinδ değerleri.....	137
Şekil 4.31.	Sünme rijitlikleri	138
Şekil 4.32.	Sünme oranları (m-değerleri).....	140
Şekil 4.33.	Yüksek sıcaklık performans sınıfları	142
Şekil 4.34.	Yüksek sıcaklık gerçek sınıfları.....	142
Şekil 4.35.	Düşük sıcaklık performans sınıfları	143
Şekil 4.36.	Düşük sıcaklık gerçek sınıfları.....	144

Şekil 4.37.	Performans sınıfı aralıkları	145
Şekil 4.38.	Gerçek sınıf aralıkları	145
Şekil 4.39.	Kullanılabilir sıcaklık farkları	146
Şekil 4.40.	Saf bitümün FT-IR spektrumu	147
Şekil 4.41.	%1.5 RET ve %0.2 PPA ile modifiye edilmiş bitümün FT-IR spektrumu	147
Şekil 4.42.	FT-IR spektrumları	148
Şekil 4.43.	Saf bitümün TG/DTG analizi.....	149
Şekil 4.44.	RET modifiyeli bitümün TG/DTG analizi.....	149
Şekil 4.45.	RET+%8 bitkisel atık yağ ile modifiye edilmiş bitüm TG/DTG analizi.....	150
Şekil 4.46.	TG eğrileri	150

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Trafik hacimlerine göre tercih edilen üst yapı türleri.....	6
Tablo 2.2.	Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler (Tunç, 2001).....	14
Tablo 2.3.	BSK'larda meydana gelen bozulmaların nedenleri (Tunç, 2001).....	15
Tablo 2.4.	Düşük ısı çatlaklarının oluşumunda etkili olan faktörler (Tunç, 2001).....	27
Tablo 2.5.	Bitüm içerisinde bulunan elementler	29
Tablo 2.6.	Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı polimerlerin avataj ve dezavantajları (Behnood ve Gharehveran, 2019)	44
Tablo 2.7.	Polimer modifikasyonunun dezavantajlarını gidermede kullanılan bazı yöntemler (Behnood ve Gharehveran, 2019)	45
Tablo 3.1.	Elvaloy RET 5160'ın teknik özellikleri (Dow, 2021).....	76
Tablo 3.2.	Karışım hazırlama parametreleri.....	79
Tablo 3.3.	Numune kodları	79
Tablo 3.4.	Karışım kombinasyonları.....	80
Tablo 4.1.	#21 numaralı mil ile yürütülen RV deneyine ait sonuçlar, cP.....	124
Tablo 4.2.	Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları	124
Tablo 4.3.	RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numunelere yapılan deneyler ve sonuçları.....	128
Tablo 4.4.	DSR deneyi sonuçları	133
Tablo 4.5.	PAV ile yaşlandırılmış numunelere ait $G^*\sin\delta$ değerleri.....	136
Tablo 4.6.	BBR deneyi sonuçları	138
Tablo 4.7.	Numunelere ait yüksek sıcaklıktaki performans sınıfları ve gerçek sınıflar	141
Tablo 4.8.	Numunelere ait düşük sıcaklıktaki performans sınıfları ve gerçek sınıflar	143
Tablo 4.9.	Performans sınıfları ve gerçek sınıflar	145
Tablo 4.10.	Pik değerlere göre bileşik türleri.....	148

1. GİRİŞ

Bir ülkede bulunan kaliteli bir karayolu ağı, o ülkenin kalkınması açısından çok önemli bir itici güç sağlamaktadır. Ülke koşulları dikkate alınarak diğer ulaştırma türleri ile koordineli bir şekilde inşa edilen karayolları, ülke çapında hızlı, güvenilir ve ekonomik bir ulaştırma hizmetini mümkün kılabilir (Yayla, 2018).

Yüksek yapım maliyetine ve kalkınmada önemli bir role sahip olması nedeniyle çok özel bir ilgi gerektiren ve oldukça karmaşık bir konu olan yol inşaatında dünyada birçok çalışma yapılmıştır (Oruç, 1997). Bu çalışmalar yol üstyapısının projelendirilmesi, kaplama malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi, kaplama performansının geliştirilmesi ve benzeri çok çeşitli konuları içermektedir. Gelişime çok açık olan bu konulardaki çalışmalar halen tüm hızıyla devam etmektedir.

Dünya çapında, yaşam standartlarının yükselmesi ve ekonomik kalkınmayla birlikte trafik hacimleri ve yükleri artmıştır. Bunun yanı sıra, yol inşaatı sırasında meydana gelen üretim hataları, hava ve iklim şartları, yetersiz bakım yapılması gibi etmenler asfalt kaplamalarda bozulmalara yol açmaktadır. Meydana gelen bozulmalar hizmet süresini ve yolun konforunu düşürmektedir. Bu sebeple, beklenenden daha erken sürede bakım-onarım çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ulaşımın %95'i gibi büyük bir oranı karayolu ile sağlanan ülkemizde, bakım-onarım maliyeti yol yapımından daha masraflı hale gelmiştir. Ülkemizde karayolu inşaatına ayrılan bütçe artırılmış olmasına rağmen bu bütçenin faydalı ve mantıklı bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Başlangıç maliyetinin ucuz olduğu kaplamaların inşa edilmesinin ilk bakışta makul olduğu düşünülse de 20 yıllık hizmet süresince meydana gelen bozulmaların bakım ve onarımı için harcanan bütçe, başlangıç maliyetinden elde edilecek olan ekonomik faydanın anlamsızlaşmasına sebep olmaktadır.

Yol hizmet ömrü süresince trafik ve çevre etkisinin oluşturduğu aşındırıcı etkilere karşı daha yüksek dirence sahip ve daha sağlam yolların inşa edilmesi için geçmişten günümüze kadar büyük çaba sarf edilmektedir. Bu sebeple üstyapının her bir tabakası için deneysel ve sayısal analizler yapılarak yüksek stabilite ve durabiliteyi karışımlar elde edilmeye çalışılmaktadır (Kök, 2007).

Asfalt kaplamalar bitüm ve agreganın birbiriyle karıştırılıp sıkıştırılması ile inşa edilen bir kaplama türüdür. Bitüm, asfalt karışımının ağırlıkça %5-7'sini, hacimce yaklaşık %15'ini oluşturmasına rağmen bitümün performansının, yolun hizmet ömrü

boyunca göstereceği performans üzerinde önemli bir etkisi vardır (Ahmedzade, 2013). Bu sebeple, asfalt kaplamaların performansının iyileştirilmesinde önemli yöntemlerden biri karışım içerisindeki bitümün performansının artırılmasıdır.

Bitümün performansını arttırmak, bitüme kendi ağırlığının belirli bir yüzdesince katkı maddesi ilave etmekle mümkündür ve piyasada birbirinden farklı birçok katkı maddesi bulunmaktadır. Her ne kadar bu işlem asfalt kaplamanın inşasında başlangıç maliyetini arttırabilse de kaliteli bir uygulama sonrasında, yol hizmet ömrü boyunca ihtiyaç duyulan bakım-onarım maliyetini azaltarak önemli bir ekonomik fayda sağlamaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar katkı maddelerinin eksikliklerinin giderilmesi için büyük bir çaba harcandığını göz önüne sermektedir. Diğer katkı malzemelerinin yüksek sıcaklıklarda depolama esnasında bitümden ayrışması problemini gidermek amacıyla reaktif polimer katkı malzemeleri üretilmiş ve reaktif polimerlerle modifiye edilen bitümler üzerine deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Genel olarak bu çalışmalar incelendiğinde reaktif polimerlerin bitümün yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiğini ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda meydana gelmesi muhtemel tekerlek izine karşı asfalt karışımın direncini arttırdığını görmek mümkündür. Bunun yanı sıra daha önce de ifade edilen depolama stabilitesini artırdığı ispatlanmıştır.

Yukarıda ifade edilen faydaların yanı sıra reaktif polimerlerin kullanımın meydana getirdiği dezavantajlar da mevcuttur. Bunlardan biri reaktif polimer ilavesinin bitümün işlenebilirliğini önemli miktarda düşürmesi ve asfalt karışım hazırlanırken karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını artırmasıdır. Benzer etki birçok katkı maddesinde meydana gelirken bu etkinin çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında bu alanda da çeşitli çalışmalar yapılarak bu eksikliğin giderilmesi üzerine önemli bir çaba sarf edilmiştir. Bu çalışmalar ilave bir katkı maddesinin modifiyeli bitüme katılması ile kompozit bir karışımın elde edilmesine dayanır. Bu ilave katkı maddelerine örnek olarak ılık asfalt katkı maddeleri ve atık yağlar gösterilebilir.

Bitkisel atık yağlar, evsel atık yağların toplanarak belirli tesislerde arıtılması sonrasında genellikle biyodizel yakıt üretimi için kullanılmaktadır. Her ne kadar bu yağların geri dönüşümde farklı alanlarda kullanımı mümkün olsa da atık yağ miktarı dünya nüfusu ile paralel olarak her geçen yıl katlanarak artmakta ve çevreye verdiği zararlar önemli derecelere ulaşmaktadır. Bu sebeple, bitkisel atık yağların asfalt

kaplamalarda kullanımının nispeten yeni bir alan olduğu ve bu kullanımın faydalı olması halinde yaygınlaşabileceği göz önüne alınarak, modifiyeli bitümün işlenebilirliğini artırmak amacıyla bitkisel atık yağ kullanımı tercih edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde reaktif polimerlerin ve bitkisel atık yağların saf bitümün reolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine etkilerinin ayrı ayrı incelendiği görülmüştür. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık performansını artırdığı bilinen reaktif polimer katkı malzemesi ile birlikte üretici firmanın tavsiyesi ve literatür incelemesi sonucunda polifosforik asit (PPA) ilave edilerek kullanılmıştır. Bu karışımın işlenebilirliğini artırmak amacıyla, saf bitüme ilave edildiğinde saf bitümün viskozitesini düşürdüğü bilinen bitkisel atık yağ ilave edilmiş ve kompozit bir modifikasyon elde edilmiştir. Dolayısıyla, reaktif polimer ile modifiye edilmiş bitümün işlenebilirliğini artırmak amacıyla bitkisel atık yağ ilave edilmesinin uygun olacağı ana fikriyle bu çalışmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra, literatürde bitkisel atık yağların bitümün düşük sıcaklık performansını artırdığı da öne sürülmüştür. Bu sebeple çalışmanın bir diğer faydalı çıktısının da bu husus olabileceği düşünülerek düşük sıcaklık performansı ile ilgili deneyler çalışmanın deney programına ilave edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme, bitümün ağırlığınca %1,5 reaktif etilen terpolimeri, %0,2 PPA ve farklı oranlarda bitkisel atık yağ ilave edilerek kompozit modifiyeli bitüm oluşturulmuştur. Hazırlanan bitümlerin fiziksel, reolojik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, trikloretilende çözünürlük, özgül ağırlık, Nicholson soyulma, Dinamik kayma reometresi (DSR), dönel viskozite (RV), eğme kirişi reometresi (BBR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabini (PAV), Fourier dönüşüm kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA) deneyleri yapılmış ve deneysel program titizlikle yürütülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

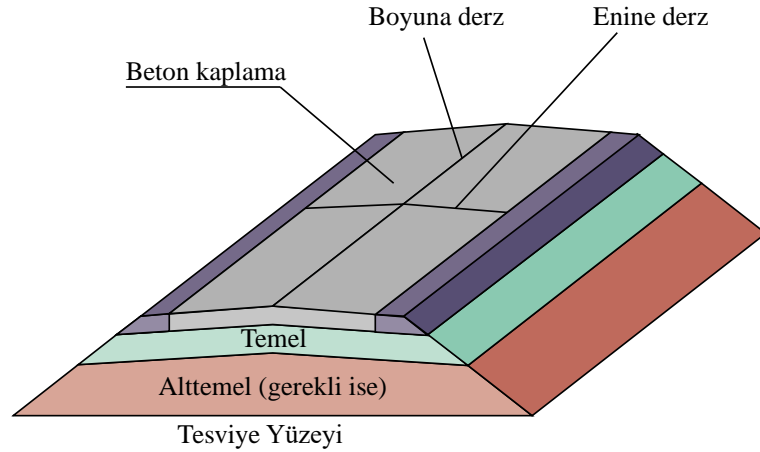
2.1. Karayolu Üstyapıları

Yol inşaatında yarma ve dolgu çalışmalarının sonunda bir tesviye yüzeyi elde edilir. Bu yüzeyin üzerine belirli özelliklerdeki seçme malzemelerin serilip sıkıştırılması ile inşa edilen tabakalı yapıya üstyapı adı verilmektedir (Kök, 2019).

Bir karayolu projesindeki kaplama tasarımını yapacak olan mühendis, trafik ve çevre etkilerini, taban zemininin taşıma gücünü ve ekonomik şartları göz önüne olarak farklı kaplama türünden birini tercih edebilir. Bu kaplama türleri; rijit, esnek ve kompozit olarak sınıflandırılabilir (Tunç, 2001).

2.1.1. Rijit Üstyapılar

Rijit üstyapılar genellikle beton plakların bir temel tabakası üzerine inşa edilmesiyle oluşmaktadır (Kök, 2019). Şekil 2.1'de bir rijit üstyapı temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Temsili rijit üstyapı görünümü (Kök, 2019)

Rijit üstyapıların kaplama tabakasını oluşturan beton kaplamalar yüksek dayanıklılığa sahiptir. Bu sayede, rijit üstyapılar ağır taşıtların oluşturacağı yükü taşıyabilecek kapasitede olurlar. Bununla birlikte, betonun çekme dayanımının düşük olması sebebiyle tekrarlı yükler altında meydana gelen çekme ve eğilme gerilmelerine karşı dayanımın artırılması amacıyla donatılar kullanılabilir.

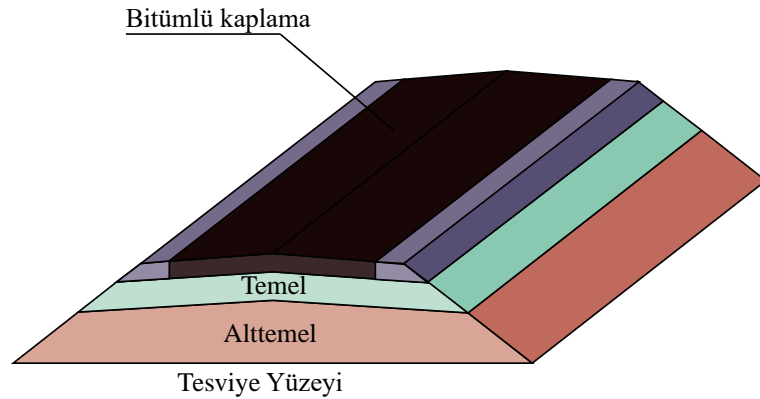
Rijit kaplamalar çok ağır taşıtların geçtiği ve çok yüksek trafik hacmine sahip yollar için tercih edilir. İlk yapım maliyetleri nispeten çok yüksek olmasına rağmen bakım masrafları düşüktür. Kuru haldeyken kayma dirençleri hemen hemen esnek üstyapılarla eşit iken ıslak halde daha yüksektir. Yuvarlanma dirençleri düşük olduğu

için taşıt işletme giderlerini, lastik ve araç yıpranmasını düşürmektedir. Plaklar halinde inşa edildikleri için plaklar arasında derzler bulunur. Bu derzler sürüş konforunu azaltmakta ve teker gürültüsünü artırmaktadır. Rijit kaplamaların inşası zordur ve titiz bir çalışmayı gerektirir. Rijit kaplamalarda inşa esnasında daha az enerji harcanır ve kullanılan malzemeler tamamen yerlidir. Ayrıca, ülkemizde çimento fabrikalarının sayısı petrol rafinerilerinden daha fazla olduğundan genellikle çimento fabrikaları inşaat sahasına daha yakın olur. Bu sebeple taşıma maliyetleri esnek kaplamalara kıyasla daha ucuzdur (Tunç, 2001).

Yukarıda belirtilen avantaj ve dezavantajlara rağmen kullanılacak kaplama tipinin tercihi aşamasında asıl dikkat edilen husus trafik hacmidir. Genellikle, 20 yıllık proje ömrü süresince 8,2 ton standart dingil yükü sayısı 60 ile 75×10^6 'dan fazla olan yollarda rijit kaplamalar inşa edilmektedir (Tunç, 2001).

2.1.2. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapılar tabakalı şekilde inşa edilir. Alt tabakalarında dren kabiliyeti yüksek granüler malzemeler ve üst tabakalarında ise yüksek stabilite ve durabiliteye sahip konforlu bir sürüş sağlayan bitümlü karışımlar bulunur (Kök, 2019). Şekil 2.2'de bir esnek üstyapı temsili olarak gösterilmiştir. Esnek üstyapılarda kullanılan bitümlü karışımların rijitliği betona kıyasla çok düşüktür. Bu durum trafik koşullarında her teker geçişinde kaplamanın mikro boyutlarda elastik deformasyon göstermesine sebep olur ve bu yüzden esnek üstyapı olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.2. Temsili esnek üstyapı görünümü (Kök, 2019)

Esnek üstyapılarda trafikten gelen yüklerden dolayı oluşan gerilme üst tabakadan en alt tabakaya doğru azalarak yayılmaktadır. Bu durum alt tabakalara doğru gidildikçe kullanılan malzemelerin kalitesinin düşürülmesine olanak sağlamaktadır. Gerilmelerin yüksek olduğu kaplama tabakasında çekme mukavemeti

daha yüksek bitümlü karışımlar tercih edilirken gerilmelerin azaldığı temel ve alttemel tabakalarında daha düşük kalitede granüler malzemenin kullanılması mümkündür. Bu durum esnek üstyapılara ekonomik bir avantaj sağlamaktadır.

Esnek üstyapıların performansını ve stabilitesini değerlendirirken birden fazla özellik göz önüne alınır. Örneğin; sürüş konforu için pürüzsüz ve düzgün yüzeylere sahip olmaları beklenirken sürüş emniyeti için kayma dirençlerinin yüksek olması gerekir. Trafik yüklerinin meydana getireceği gerilmelere karşı yeterince mukavemetli olmaları istenir. Ayrıca, çevre etkilerine karşı dayanıklı yani durabil olmaları da önemli bir gereksinimdir (Tunç, 2001).

Esnek üstyapılar rijit üstyapılarla kıyaslandığında; daha çabuk ve kolay inşa edilebildiği, bakım ve onarım işlerinin daha kolay ve hızlı olduğu, bakım ve onarım esnasında yolun tamamen trafiğe kapanmasının gerekmediği ve kademeli inşaat için uygun olduğu söylenebilir. Bununla birlikte bazı dezavantajları da mevcuttur. Örneğin; esnek üstyapıların rutin bakım masrafları yüksek, yorulma dayanımları düşüktür. Belirli süre aralıklarında aşınma tabakasının yeniden yapılmasına ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, yağışlı havalarda sürtünme dirençleri oldukça düşüktür (Tunç, 2001).

Esnek ve rijit üstyapıları birbirleriyle daha detaylı kıyaslamak elbette mümkündür. Detaylı bir kıyaslama yapıldığında bile iki tip kaplamanın birbirine karşı net bir üstünlüğünden bahsetmek doğru olmayacaktır. İki kaplama türünün de avantajları ve dezavantajları vardır ve bu doğrultuda ihtiyaç duyulan özellikler dikkate alınarak kaplama türü tercih edilmelidir. Buna rağmen, ülkemiz için tercih aşamasında, bir önceki bölümde belirtildiği üzere, ana kriter trafik hacmidir. Trafik hacmine göre farklı kalitede esnek üstyapılar inşa etmek mümkündür. Trafik hacmi arttıkça esnek üstyapı kalitesi de artmaktadır. Aşağıda (Tablo 2.1) sınır trafik hacim değerleri ve seçilmesi gereken esnek üstyapı türü verilmiştir.

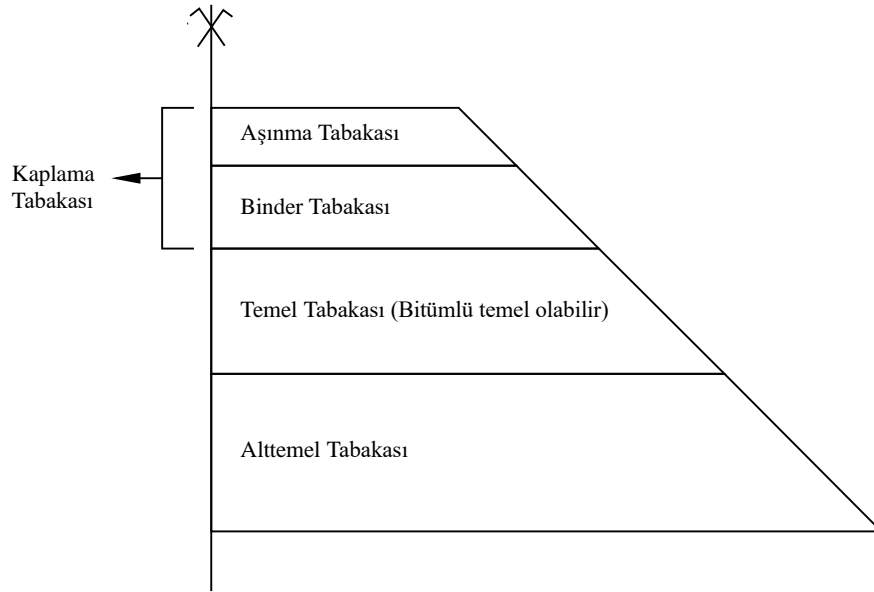
Tablo 2.1. Trafik hacimlerine göre tercih edilen üst yapı türleri

Trafik Hacmi (Toplam eşdeğer standart dingil yükü sayısı, T _{8,2})	Üstyapı Türü
< 40.000	Kaplamasız (Stabilize)
40.000 – 100.000	Tek kat sathi kaplama veya kaplamasız
100.000 – 500.000	Tek kat sathi kaplama
500.000 – 2.000.000	Çift kat sathi kaplama
> 2.000.000	Bitümlü sıcak karışım (BSK)

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı üzere esnek üstyapı tipleri arasında en yüksek kaliteye sahip olan bitümlü sıcak karışımlardır (BSK). Bu sebeple, ilerleyen bölümlerde BSK'lar daha derinlemesine incelenecektir. İçerisinde bulunan malzemeler ve özellikleri, performansını etkileyen hususlar ve benzeri konular hakkında bilgi verilecektir.

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Otoyollar, havaalanları ve yüksek standartlı karayolların kaplamaları inşa edilirken yüksek performans gösterebilecek bitümlü sıcak karışımlar (BSK) tercih edilmektedir. BSK'lar tesviye yüzeyi üzerine önce alttemel tabakasının serilip sıkıştırılması, ardından temel tabakasının serilip sıkıştırılması ve sonrasında iki ayrı tabaka (binder ve aşınma) halinde bitümlü kaplama tabakasının serilip sıkıştırılması ile inşa edilir. Şekil 2.3'te BSK'ların tabakaları genel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. BSK tabakaları

Alttemel tabakası, taban zemini üzerine granüler malzeme ile inşa edilen ve temel tabakasından gelen yükleri güvenli bir şekilde aktarmakla görevli olan üstyapı tabakasıdır. Temel tabakası, kaplama tabakası ile alttemel tabakası arasında bağlantı ve düzgünlük sağlayıp yük aktarımını gerçekleştiren tabakadır. Tercihe göre bir miktar bitüm kullanılarak inşa edilebilir. Kaplama tabakası binder ve aşınma olmak üzere ikiye ayrılır. Binder tabakası, temel tabakası üzerine inşa edilen BSK tabakasıdır. Aşınma tabakası ise üstyapının en üst tabakasını oluşturan BSK tabakasıdır (KGM,

2013). Aşınma tabakası trafik ve çevre ile doğrudan temas halinde olduğu için sürüş konforu, güven ve dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir.

BSK'ların birçok karakteristik özellikleri vardır ve bunların her biri BSK'ların performansında etkili bir rol oynamaktadır. Bu bölümde öncelikle BSK'ların sahip olduğu özelliklerden bahsedilecek ve her biri ayrı alt başlıklar halinde dikkate alınacaktır. Ardından, BSK'ların inşası ve hizmet ömrü esnasında meydana gelmesi muhtemel bozulmalara değinilecektir.

2.2.1. BSK'ların Özellikleri

BSK'ların uygulamadaki performansı her bir tabakasının sahip olduğu karakteristik özelliklerle yakından alakalı olduğu için bu özelliklerin detaylı olarak bilinmesi gerekir. Tüm özelliklerin ideal bir şekilde sağlanması pek mümkün olmamakla birlikte uygulamada optimum dizaynlar yürütülerek ideale yakın kaplamaların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

2.2.1.1. Stabilite

BSK'ların trafik yükü altında meydana gelen deformasyonlara karşı gösterdiği dirence stabilite adı verilir. Bu durumda, bir BSK'nın stabilite değeri ne kadar düşük olursa trafik yükü altında meydana gelecek deformasyon miktarı da o denli fazla olacaktır. Bu sebeple, bir BSK'nın stabilite değerinin düşük olması istenmeyen bir durumdur. Bununla birlikte, BSK'larda stabilitenin çok yüksek olması da istenmez. Çünkü aşırı yüksek stabilite (çok rijit veya gevrek) meydana gelecek gerilmelere karşı kaplamanın esnekliğini kaybetmesine ve dolayısıyla kaplamada çatlakların oluşmasına sebep olacaktır. Stabiliteye etki eden üç faktör vardır. Bunlar; kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direnci olarak sıralanabilir (Tunç, 2001).

BSK'ların kayma mukavemeti, $\tau = c + \sigma \tan\phi$ şekilde tanımlanabilir. Bu denklemde ϕ içsel sürtünme açısını, c ise kohezyonu ifade eder. İçsel sürtünme açısı agregalar arası sürtünme ve kenetlenmeden etkilenirken kohezyon ise agrega ile bitüm arasındaki bağ kuvvetinden etkilenir. Agreganın içsel sürtünme direnci, danelerin yüzey pürüzlüğü ve kırılmışlık oranı arttıkça, karışımın boşluk oranı azaldıkça önemli derecede artış göstermektedir. Kohezyon; agreganın absorpsiyonu ve porozluğu arttıkça, bitüm miktarı (optimuma kadar) arttıkça, bitümün viskozluğu arttıkça, bitümün ısısı azaldıkça, yükleme hızı arttıkça, karışım ve serme-sıkıştırma ısısı arttıkça ve filler/bitüm oranı azaldıkça önemli bir artış göstermektedir (Tunç, 2001).

Isının stabilite üzerindeki etkisini farklı açılardan incelemek mümkündür. Örneğin karışım hazırlanırken tercih edilen ısı ile hizmet ömrü esnasında iklimden kaynaklı ısının etkisi birbirinden farklı olarak düşünülmelidir. Karışım hazırlanırken ısı arttıkça agreganın bitüm absorpsiyonu artarak bitüm ile arasındaki adezyon güçlenmektedir. Bu durum, BSK'nın stabilitesinde bir artışa sebep olmaktadır. Ayrıca, yüksek karışım hazırlama sıcaklıkları bitümün akmaya karşı direncini (viskozitesini) düşürür ve daha iyi sıkışmasına yardımcı olur. Bu sebeple, karışımın yoğunluğu yükselir ve stabilitesi artar. Öte yandan, hizmet ömrü esnasında ısının etkisi bitümün özelliği sebebiyle tamamen farklı olmaktadır. Bitüm termoplastik bir malzemedir, yani ısı arttıkça plastik bir malzemeye dönüşmektedir. Bu sebeple, çevredeki ısının artması kaplamadaki bitümün plastikleşmesine ve dolayısıyla kaplama stabilitesinin düşmesine yol açmaktadır. Çevredeki ısının çok düşük olması durumunda ise bitüm gevrek bir malzemeye dönüşmektedir. Gevreklik aşırı artarsa trafik yükleri altında oluşan çatlaklar kaplamanın kütleli olarak ayrışmasına ve dolayısıyla stabilitenin azalmasına sebep olmaktadır (Tunç, 2001).

BSK kütleli trafik yükleri etkisinde ötelenmeye karşı gösterdiği dirence eylemsizlik direnci adı verilir. Yükün miktarı azaldıkça, kaplama kalınlığı ve yükleme hızı arttıkça eylemsizlik direnci artış göstermektedir. Böylece BSK'nın stabilitesinde de artış meydana gelmektedir (Tunç, 2001).

BSK'ların stabilitesi son derece karmaşık bir özellik olup bazı deneysel yöntemlerle belirlenmesi mümkündür. Bu deneysel yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı Marshall stabilite deneyidir.

2.2.1.2. Rijitlik

Rijitlik, belirli sıcaklık ve yükleme süresi (veya yükleme hızı) altında BSK'ların gerilme ve deformasyon ilişkisinin ifadesidir. BSK'lar viskoelastik malzemelerdir ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla "Rijitlik Modülü"nden faydalanılır. Rijitlik modülü, elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzerdir. Ancak, elastikiyet modülü herhangi bir faktöre bağlı değilken rijitlik modülü ısı ve yükleme hızına (ya da yükleme süresine) bağlıdır.

BSK'larda karışımın içerisinde bulunan malzemeler rijitliğin belirlenmesinde ikincil öneme sahiptirler. Birincil öneme sahip olan faktörler daha önce belirtildiği üzere ısı ve yükleme hızıdır. Bu faktörlere göre; yükleme süresi azaldıkça (veya

yükleme hızı arttıkça), ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça ve bitümün penetrasyon değeri azaldıkça rijitlik artacaktır. BSK'ların rijitliğinin belirlenmesinde çeşitli deneysel yöntemler kullanılmakla birlikte Marshall deneyi ile de rijitlik hakkında bir bilgi edinmek mümkündür (Tunç, 2001).

2.2.1.3. Durabilite

BSK'ların trafik ve çevre koşullarına karşı gösterdiği direnç durabilite olarak adlandırılır. Başka bir deyişle, yüksek durabiliteli BSK; bitümün yaşlanmasına (zamanla sertleşmesi), agrega danelerinin kırılmasına, ufalanmasına ve bitümün soyulmasına karşı dayanıklıdır.

Kaplamanın içerisine girebilecek su ve hava miktarının azaltılması ile bitümün oksidasyonu yavaşlatılabilir. Bu durumun sağlanması için karışımın geçirimsizliğinin artırılmasına ihtiyaç vardır. Bitüm miktarının optimuma kadar artırılması karışımın geçirimsizliğini en yüksek seviyeye ulaştıracaktır. Ayrıca, bitüm miktarının artması bitüm filmi kalınlığını artırarak yaşlanmanın yavaşlamasını da sağlar. Aksi takdirde, kolay yaşlanan bir bitüm hızla sertleşecektir ve sertleşen bitüm sebebiyle kaplamada soyulmalar ve çatlaklar artacaktır.

Yukarıda belirtilen hususlar dikkate alındığında; bitüm oranı optimuma kadar arttıkça, bitüm penetrasyonu azaldıkça, bitümün film tabakası kalınlaştıkça, soyulma direnci arttıkça, sıkışma miktarı arttıkça, agrega gradasyonu yoğunlaştıkça BSK'ların durabilitelerinin arttığını söylemek mümkündür.

Ağır taşıt trafiğinin yüksek olduğu yollarda, yüksek standartlı yollarda, tırmanma şeritlerinde, durma ve kalkmaların yoğun olduğu kavşaklarda, otobüs duraklarında stabilitesi ve durabilitesi yüksek BSK'lar kullanılmalıdır (Tunç, 2001).

2.2.1.4. Yorulma Dayanımı

BSK'ların kaplamada çatlama oluşmadan tekerrür eden yükler altında kalıcı olmayan deformasyonların meydana gelmesine (eğilmeye) izin verme kabiliyetine yorulma dayanımı denir. Yani, kaplamanın sahip olduğu çekme dayanımının altında etkiyen trafik yüklerinin maksimum tekerrür sayısına denk gelen dayanım değeridir. Başka bir ifadeyle, kaplamanın tekrarlı eğilme yükleri etkisi altında çatlama göstermediği dirençtir.

Yorulma dayanımından yüksek tekerrür sayısında trafik yüklerine maruz kalan kaplamalarda yorulma kaynaklı bozulmalar meydana gelir. Ancak, kritik tekerrür sayısı birçok faktöre bağlıdır ve bu faktörlerdeki özelliklerin geliştirilmesi ile yorulma dayanımının artırılması mümkündür. Öncelikle, çekme dayanımı yüksek bir malzeme kullanımı yorulma dayanımını artırıcı bir performans sergilemektedir. Dolayısıyla, sert bitümlere kıyasla yumuşak bitümlerin tercih edilmesi yorulma dayanımında bir artış sağlar. Bununla birlikte, karışımın yoğunluğu, sertliği ve kohezyonu arttıkça, boşluk oranı azaldıkça, filler ve bitüm miktarı arttıkça yorulma dayanımında artış meydana gelir.

Genel olarak; rijitlik arttıkça, agrega gradasyonunun yoğunluğu arttıkça, bitümün penetrasyonu arttıkça, kaplama kalınlığı arttıkça, bitüm miktarı optimuma kadar arttıkça, meydana gelen eğilme gerilmeleri azaldıkça, yorulma dayanımı artmaktadır (Tunç, 2001).

2.2.1.5. Esneklik

BSK'ların temel tabakasında ve zeminde meydana gelen oturmalara uyum sağlayabilme kapasitesine esneklik adı verilir. Zemin malzemesi kil gibi sıkışabilen bir malzeme ise yol güzergâhı boyunca farklı oturmalar meydana gelecektir. Bununla birlikte, yarma ve dolgularda meydana gelecek olan oturma miktarları çeşit sebeplerden ötürü birbirinden farklı olur. Eğer kaplama uzun dönemde bu oturmalara uyum sağlayamazsa yolda oturma çatlakları görülecektir. Eğer kaplama yeterli esnekliğe sahip olursa oturma farklılıklarına uyum sağlar ve meydana gelmesi muhtemel bozulmaları önler. Ayrıca, don kabarması meydana gelmesi durumunda kaplamada zeminden yukarı doğru ilerleyen bir gerilme meydana gelecektir. Eğer kaplamanın esnekliği çok düşükse kaplamada bu sebepten kaynaklı bozulmaların meydana gelmesi kaçınılmaz olur.

Genel olarak; bitüm içeriği arttıkça ve agrega gradasyonu açık olunca BSK'nın esnekliği artmaktadır. Bununla birlikte, yüksek esneklik kaplamanın stabilitesini düşürmektedir. Ayrıca, bir önceki bölümde bahsedildiği üzere karışımın sertliği arttıkça yorulma dayanımı artmaktadır. Esnekliği yüksek olan bir karışımın stabilitesi ve dolayısıyla rijitliği düşük olacaktır. Böylece, esnekliği yüksek karışımların yorulma dayanımlarının düşük olacağı sonucuna varmak mümkündür. Bu sebeple, karışımın esnekliği optimum seviyede olmalıdır (Tunç, 2001).

2.2.1.6. Geçirimsizlik

BSK'larda kaplamanın içerisine hava ve suyun girmesine karşı kaplamanın gösterdiği direncin bir ölçüsü geçirimsizliktir. Kaplamada bulunan boşluklar ve bu boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları sayesinde kaplamanın üstünden altına doğru hava, su ve su buharının geçişi gerçekleşir. Geçirimsizliğin artması bu bağlantıların ve boşlukların azalması anlamına gelir. Genel olarak; bitüm miktarı arttıkça, agrega gradasyonunun yoğunluğu arttıkça ve sıkıştırma arttıkça geçirimsizlik de artmaktadır. Ancak, BSK'lar ile ilgili bir çok özelliğe olduğu gibi geçirimsizlik için de bir optimum miktar uygun görülür ve kaplamadaki geçirimsizlik karışımın boşluk oranı dikkate alınarak belirlenir. Sıcak havalarda bitümün kaplama yüzeyinden dışarı çıkmasını engellemek ve trafik yükleri altında kaplamanın bir miktar sıkışmasına müsaade ederek degradasyonu önlemek amacıyla bir minimum boşluk oranı belirlenir. Ayrıca, bitümün sertleşmesini azaltmak ve içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek amacıyla da bir maksimum boşluk oranı belirlenir.

Yeterli geçirimsizlik ve yoğunluğun sağlanabilmesi için şartnamelerde bitümlü temel tabakası için %5-9, binder tabakası için %4-6 ve aşınma tabakası için %3-5 aralıklarında boşluk oranı bulunması zorunlu tutulmuştur (Tunç, 2001).

2.2.1.7. Kayma Direnci

Kaplama üzerinde giden araçların frenleme esnasında yeterli mesafede emniyetle durabilmesi ve kurbalarda meydana gelen merkezkaç kuvvetinden ötürü savrulmamları için tekerlekler ile kaplama arasında yeterli seviyede sürtünme direnci olmalıdır. Bu sürtünme direnci BSK'nın kayma direncini ifade eder. Genel olarak; bitüm miktarı azaldıkça, agregaların cilalanma direnci arttıkça, agregaların pürüzlülükleri arttıkça, agrega gradasyonu açık ve kaba olduğunda BSK'nın kayma direnci artış göstermektedir. Bununla birlikte, kayma direncinin artması yüzey düzgünlüğünün bozulması anlamına gelir ve bu durum sürüş konforunda azalmaya sebep olur.

Kayma direncine etki eden faktörler arasında agrega boyutu birinci derece öneme sahiptir. Ayrıca, agregaların cilalanma dirençleri de kayma direnci üzerinde büyük bir etki göstermektedir. Cilalanmış agregalar kayma direncini önemli miktarda düşürdükleri için agregaların cilalanma dirençlerinin yüksek olması istenir. Bununla birlikte, karışıma optimum miktardan fazla ilave edilen bitümden kaynaklı kuma ve

terlemeler kayma direncini azaltırlar. Yağışlı havalarda çok düşük kayma direnci ciddi tehlikelere yol açmaktadır.

Makadam ve sathi kaplamalarda konfor az ve tekerlek gürültüsü çok fazla olmasına rağmen kayma direnci çok yüksektir. Yüksek konforlu BSK'larda ise diğer kaplamalara kıyasla kayma direnci daha azdır. Bu sebeple, dik eğimler ve keskin kurbalar gibi yol geometrisinin tehlikeli olduğu kısımlarda kaplamanın kayma direncini artırıcı önlemler almak gerekli olabilir (Tunç, 2001).

2.2.1.8. İşlenebilirlik

BSK'nın serme ve sıkıştırma işlemleri sırasında gösterdiği kolaylık seviyesine işlenebilirlik adı verilir. İşlenebilirlik, karışım içerisindeki agregaların yer değiştirmeye karşı gösterdiği direnç ile ters orantılıdır. Eğer bir karışımın işlenebilirliği düşük ise serme ve sıkıştırma esnasında zorluklar meydana gelir. Bu zorluklar kaplamanın yeterince sıkıştırılamamasına ve dolayısıyla stabilite kaybına yol açar. Bununla birlikte, eğer karışım içerisindeki agregaların pürüzlülüğü çok düşük ise işlenebilirliği çok yüksek olacaktır. Ancak, genelde bu tip agregalar dere malzemesi olmaktadır ve kaplamanın stabilitesini önemli miktarda azaltmaktadır. Anlaşılacağı üzere BSK'ların diğer özellikleri gibi işlenebilirliğinin de optimum seviye olması gerekir.

Bitümün sertlik derecesi veya penetrasyonu da işlenebilirlik üzerinde büyük öneme sahiptir. Bitüm sertleştikçe ya da penetrasyon değeri düştükçe akmaya karşı direnci artmaktadır. Bu durum karışımın işlenebilirliğini kaybetmesine veya gerekli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için karışımın daha yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasına sebep olur.

Genel olarak; kaba agrega miktarı arttıkça, maksimum dane boyutu arttıkça, agreganın yüzey pürüzlülüğü arttıkça, karışım ısısı azaldıkça, bitüm penetrasyonu azaldıkça, filler miktarı aşırı arttıkça, BSK'nın işlenebilirliği azalmaktadır (Tunç, 2001).

Aşağıda, Tablo 2.2'de BSK'ların özelliklerine etki eden parametreler toplu halde gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler (Tunç, 2001)

KARIŞIM ÖZELLİĞİ	BİTÜM		AGREGA		YOĞUNLUK ISI		YÜKLEME HIZI		KARIŞIM KALINLIĞI		
	Miktar	Agrega Tipi	Agrega Yoğunluğu	AZ	ÇOK	AZ	ÇOK	DÜŞÜK	YÜKSEK	AZ	ÇOK
	Katılık										
	Yumuşak Katı	Fazla	Yuvarlak Köşeli Cilalı Az Pürüzlü Poroz	Az Yoğun	Çok Yoğun						
STABİLİTE	√	Optimum (1)	√	√	√	√	√	√	√	√	√
RIJİTLİK	√	(2)	√	√	√	√	√	√	√	√	√
DURABİLİTE	√	√	√	√	√	√	(4)	√	√	√	√
YORULMA DAYANIMI	√	√	√	√	√	√	(6)	√	√	√	√
ESNEKLİK	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√
GEÇİRİMSİZLİK	√	√	(5)	√	√	√	(7)	√	-	√	√
KAYMA DİRENCİ	√	√	√	√	√	√	√	√	-	-	-
İŞLENEBİLİRLİK	√	(3)	√	√	√	-	√	√	-	-	√

(1) Bitüm yüzdesi optimum civarında ancak optimumdan az ise yüksek stabilite aksi halde düşük stabilite

(2) Bitüm katı ve ısı düşük ise fazla bitüm %sinde aksi halde az bitüm %sinde

(3) Genel olarak az bitüm yüzdesinde

(4) Isının durabilite üzerindeki etkisi: Isı çok yüksekse bitüm soyulması ısı çok düşükse büzülme çatlakları artar.

(5) Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar

(6) Isının yorulma dayanımı üzerinde direkt etkisi yoktur

(7) Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, dizayn boşluk oranı civarındadır

2.2.2. BSK'larda Meydana Gelen Bozulmalar

Esnek üstyapılar trafiğe açıldıktan sonra kaplamalarda çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmaların nedenleri kabaca Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. BSK'larda meydana gelen bozulmaların nedenleri (Tunç, 2001)

Genel Nedenler	Yetersiz mukavemetteki alttemel, temel malzemeleri Trafığın mekanik etkisi (yük, yük tekrarı, sürtünme) İklim (yağmur, kar, donma - büzülme, sıcaklık ayrımları Kaplama malzemesinin yetersizliği
Kalite Eksikliği	Gradasyon hatası Yuvarlak agrega kullanımı Agreganın mukavemetinin düşüklüğü Agreganın kirliliği Agreganın sürtünme mukavemetinin olmayışı
Karışımın Hazırlanmasındaki Hatalar	Bitüm yüzdesinin hatalı olması Bitüm malzemesinin kalitesi Isı kontrolün düzensizliği
Yapım Hataları	Sıkıştırma eksikliği Fazla sıkıştırma Düşük ısıda yapım Yapım sırasında malzemenin ayrışımı Diğer dikkatsizlikler

Meydana gelen bozulmalar üç ana başlık altında toplanabilir:

- Deformasyonlar
- Ayrışmalar
- Çatlamlar

2.2.2.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, kaplama inşasından bir süre sonra meydana gelen yapısal bozukluklardır (Tunç, 2001). Bu tip bozulmalar, yol sathında ilk plan ve boykesitteki şekle göre ortaya çıkan her türlü değişimdir. Genellikle düşük stabiliteli BSK'ların uygulanması nedeni ile oluşur. Bununla birlikte, yetersiz sıkışma, aşınma tabakasındaki aşırı filler ve bitüm, alt tabakalarda ve zeminde meydana gelen aşırı yer değiştirmeler, yetersiz tabaka kalınlıkları ve yetersiz drenaj gibi farklı sebeplerden dolayı da deformasyon oluşması muhtemeldir.

2.2.2.1.1. Tekerlek İzleri

Tekerlek izleri, kaplama veya altındaki bir ya da birden fazla tabakada, trafik yüklerinden kaynaklı olarak meydana gelir. Trafığın geçtiği izler boyunca meydana gelen kalıcı deformasyonların birikiminden oluşur. Özellikle ağır taşıt trafiğinin fazla

olduğu yollarda bu tip bozulmalarla karşılaşılır. Şekil 2.4'te tekerlek izi oluşmuş bir kaplama örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kaplamada tekerlek izi (Line.17qq, 2021)

Genellikle; ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı, ağır taşıtların yavaş hızda seyretmesi, hava sıcaklığının yüksek olması, temel tabakası kalınlığının yetersiz olması, zemin mukavemetinin düşük olması, bitüm ve filler miktarının fazla olması, bitümün penetrasyonunun yüksek olması, agregaların pürüzlülüğünün düşük olması ve sıkıştırmanın yetersiz olması gibi sebeplerden dolayı tekerlek izleri oluşur (Tunç, 2001).

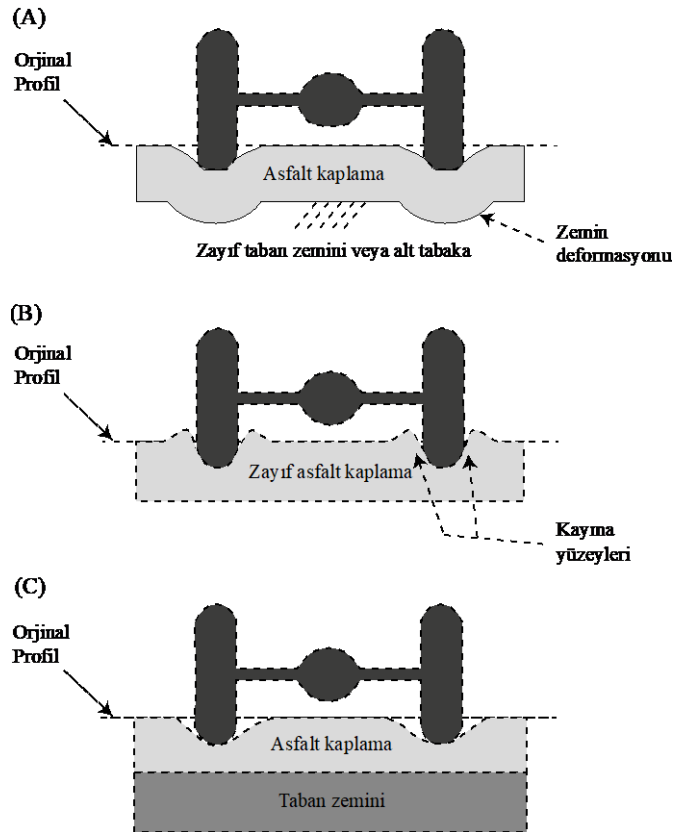
Tekerlek izinin oluşum şekline bağlı olarak dört farklı tipte tekerlek izi meydana gelir; yapısal tekerlek izi, akma tekerlek izi, aşınma tekerlek izi ve oturma (konsolidasyon – sıkışma) tekerlek izi (Kutluhan ve Ağar, 2009).

Yapısal tekerlek izi, kaplama tabakasının altındaki bir veya birden fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlar sonucu meydana gelir. Bu deformasyonlar yükün meydana getirdiği gerilmelerin malzeme dayanımından fazla olması sebebiyle oluşur. Yapısal tekerlek izi oluştuğunda tekerlek izi etrafında kabarmalar görülmez. Kaplamanın trafik koşullarına uygun tasarlanmadığı, düşük kaliteli malzemelerin kullanıldığı, yeterli derecede sıkıştırılmamış, kötü drenaja sahip yollarda görülür (Kutluhan ve Ağar, 2009).

Akma tekerlek izi, bitümlü tabakaların kendi içlerindeki deformasyonlar sonucu meydana gelir. Bunun nedeni, trafik yükünden dolayı oluşan gerilmenin bitümlü kaplamanın dayanımını aşmasıdır. Bu tip tekerlek izi oluşumunda tekerlek izi etrafında kabarmalar görmek mümkündür. Genellikle, çıkış eğimli kesimlerde, kavşak

yaklaşımlarında ve kurbalarda oluşur. Bunun sebebi, yolların bu kesimlerinde taşıt seyir hızlarının azalması ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin artmasıdır. Akma tipi tekerlek izi oluşumunda ana faktörler, BSK’da bileşenlerin özellikleri ve karışım oranlarıdır (Kutluhan ve Ağar, 2009).

Aşınma tekerlek izi ve oturma tekerlek izi biçimsel olarak birbirine benzemektedir ve ikisi birlikte yüzeysel tekerlek izi türünü oluştururlar. Aşınma tekerlek izi, çivili tekerlek lastiklerinin kullanılması sonucunda ortaya çıkan bir bozulmadır. Özellikle Kuzey Avrupa ülkelerindeki yollarda bu tür bozulmalarla karşılaşmak mümkündür. Aşınma tekerlek izinin meydana gelmemesi için kaplamadaki agrega dane boyutun büyük olması gerekir. Oturma tekerlek izi ise kaplamanın inşası esnasında yetersiz sıkıştırma yapılması durumunda meydana gelir. Yüzeysel tekerlek izlerinde de tekerlek kenarlarında kabarmalar meydana gelmez (Kutluhan ve Ağar, 2009). Şekil 2.5’te tekerlek izi tiplerinin teorik çizimleri toplu bir şekilde gösterilmiştir.



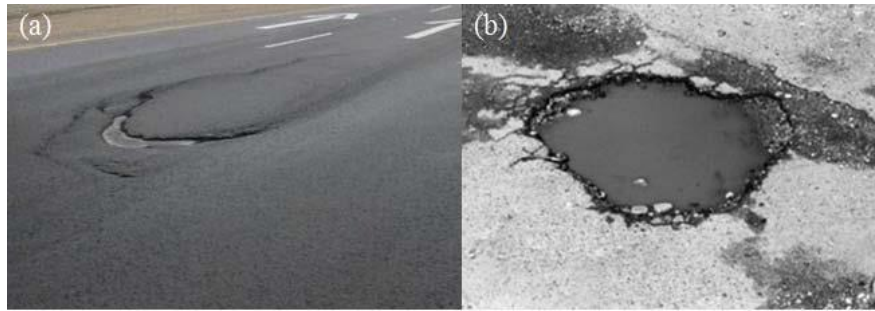
Şekil 2.5. Tekerlek izi tipleri: (A) yapısal tekerlek izi, (B) akma tekerlek izi ve (C) aşınma ve oturma tekerlek izi (Kutluhan ve Ağar, 2009)

2.2.2.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Bu tip bozulmalar yolda yer yer 0.50-2.0 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutta bölgesel çökme veya oturmalar şeklinde oluşur. Diğer tip deformasyonların oluşma sebeplerine ilaveten oturma ve çökmeler; yetersiz sıkışma, yetersiz gradasyon, aşırı segregasyon, aşırı su içeriği, drenaj, zemin ve imalat problemleri gibi nedenlerle de ortaya çıkabilmektedir. Bu tip bozulmalar bölgesel bozulmalar olduğu için tadilatı diğer bozulmalara kıyasla daha kolaydır. Deformasyona uğramış olan kesim kazıldıktan sonra uygun BSK veya soğuk karışım ile doldurulup sıkıştırılarak bu tür bozuklukların giderilmesi mümkündür (Tunç, 2001).

Oturmalar (Şekil 2.6(a)), yol orta çizgisi boyunca ya da kenar şeritlerde uzunlamasına ya da enlemesine oluşur. Alttabakalarda meydana gelen oturmalara kaplama tabakası uyum sağlamaya çalışır. Ancak, asfalt kaplama bu oturmalara ayak uydurmakta zorlandığı zaman oturmalarda çatlaklar meydana gelir. Oturmaların önlenmesi için alt tabakaların projelendirilmesi dikkatlice yapılmalıdır. Taban zemini zayıf ise sıkıştırılmalı veya stabilize hale getirilmelidir.

Çökmeler (Şekil 2.6(b)), kaplamanın kendi sathına göre düşük kotlarda kalmış küçük çukurlardır. Derinlikleri 2.5 cm veya daha fazla olabilmektedir. Bu durum, yağmur yağduğunda çökmelerin olduğu bölgelerde suyun birikmesine sebep olur. Çökmeler zamanla genişleyerek yolun tamamen kullanışsız hale gelmesine sebep olabilirler. Önlem olarak; yoldaki drenaj sistemi iyi inşa edilmeli, kaplama altındaki tabakalar yeterli ve üniform sıkıştırılmalı, çöken kısımlara mutlaka tadilat yapılmalıdır.



Şekil 2.6. Kaplamada (a) oturma ve (b) çökme (Yılmaz, 2016)

2.2.2.1.3. Ondülasyon ve Yığılmalar

Bu tip bozulmalar yol üzerinde trafiğin akış yönüne göre enine doğrultuda oluşurlar. Biçimsel olarak dalgaya benzerler ve yüzeysel bozulmalardır. Yüzeysel oldukları için tadilatları kolay ve mümkündür.

Yaya geçişleri, otobüs durakları, kavşaklar, aşırı eğimli ve benzeri kesimlerde meydana gelirler. Genel olarak; karışımların stabilitesinin düşük olmasından, aşınma tabakası kalınlığının yetersizliğinden, bitümün viskozitesinin çok düşük olmasından, fazla bitüm kullanılmasından, binder tabakasının kullanılmamasından, frenleme ve kalkma hareketlerinden kaynaklanmaktadır (Tunç, 2001). Şekil 2.7’de bir kaplama üzerinde meydana gelen ondülasyonlara bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kaplamada ondülasyon ve yığılma (Bisantiye, 2021)

2.2.2.1.4. Kabarmalar

Kabarmalar, satıh tabakasının yukarıya doğru bölgesel deformasyonudur. Taban zemininin ve üstyapı tabakalarının şişmesinden dolayı meydana gelir. Taban zemini iki sebepten dolayı şişebilir. İlk olarak, eğer taban zemini dona duyarlı ise donma-çözülme etkisi altında şişme sergiler. Diğer bir sebep ise taban zeminini teşkil eden malzemelerin kil gibi su ile temas ettiğinde şişen malzemelerden oluşmasıdır. Bu durumda, taban zemini su ile temas ettiğinde şişmeye başlar. Her iki durumda da taban zemininde meydana gelen deformasyonlar üst tabakalara yansiyarak kaplamada kabarmaların oluşmasına neden olur. Önlem olarak yol güzergâhının don etkisi altında kalmayacak şekilde seçilmesi uygun olmaktadır. Ancak, don etkisi altında kalma zorunlu ise alttemel tabakası altında uygun kalınlıkta dona duyarlı malzemenin serilip sıkıştırılması da diğer bir çözüm yöntemidir. Ayrıca, zeminin stabilizasyonu ve

yeterli drenajın sağlanması ile de kabarmaların oluşmasını önlemek mümkündür (Tunç, 2001). Şekil 2.8’de yüzeyinde kabarma oluşmuş bir asfalt kaplama gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Kaplamada kabarma (IDEA, 2021)

2.2.2.2. Ayrışmalar

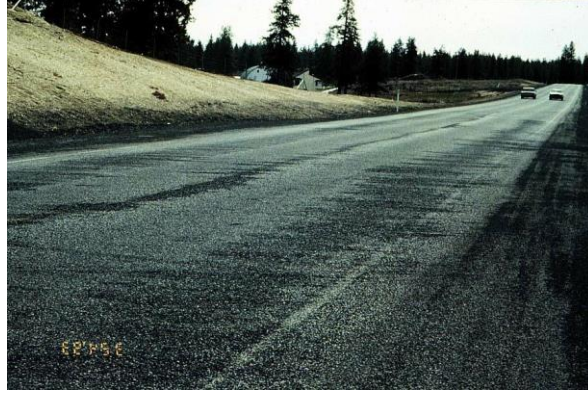
Ayrışmalar, trafik ve iklim etkisi ile aşınma tabakasının küçük parçalar halinde kopma ve parçalanması şeklinde meydana gelir. Ayrıca, agregaların bitümden koparak ayrılması halinde de gerçekleşebilir. Genel olarak; yapım hatalarından, malzeme kalitesinin düşüklüğünden, segregasyondan, homojen olmayan karışımdan ve yüksek penetrasyonlu yetersiz bitümden kaynaklanır (Tunç, 2001). Bu etkiler genellikle tek başına ayrışma için yeterli olmamaktadır. Bu sebeple, bir ya da daha fazlası trafiğin mekanik etkisiyle birlikte ayrışmaya sebep olmaktadır.

Bu tip bozulmaların başka bir özelliği de tadilat yapılmadığında zaman içerisinde büyüyüp gelişmeleridir. Bu nedenle, ayrışmanın meydana geldiği gözlemlenen yollarda tadilat işleri mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilmelidir.

2.2.2.2.1. Sökülmeler

Aşınma tabakasının parça parça veya tabaka halinde soyulmasıyla sökülmeler meydana gelmektedir. Sökülmeler, agrega danelerinin yerlerinden ayrılmasıyla, yüzeyden aşağıya ya da kenarlardan içeriye doğru gelişen bozulmalardır. Öncelikle küçük parçalar yüzeyden ayrılır ve ardında küçük boşluklar bırakır. Bunu takiben, zaman daha büyük parçalar ayrılmaya devam eder. Böylece, parçalar veya tabakalar halinde sökülmeler oluşur. Yetersiz sıkışma, kirli veya segregasyona uğramış agrega kullanımı, soğuk veya nemli havalarda imalat yapılması, az miktarda bitüm kullanımı,

bitümün karışım esnasında çok fazla ısıtılması, aşınma tabakasının kalınlığının çok az olması gibi sebeplerden dolayı genellikle sökümler meydana gelmektedir. Kaplamadan sökümler meydana geldiğinde önlem almak amacıyla koruyucu kaplama tabakası (*seal coat*) inşası gerçekleştirilebilir (Tunç, 2001). Şekil 2.9'da sökülmeye maruz kalmış bir asfalt kaplama gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Kaplamada sökülme (PavementInteractive, 2021d)

2.2.2.2.2. Çukurlar

Kaplama malzemesinin bölgesel olarak kaybolmasıyla, yol yüzeyinde çanak şeklinde oluşan çukurlardır. Genellikle yuvarlak şekilli olmakla birlikte çapları 25-75 cm aralığındadır. Çukurlar sökülmenin üst düzeydeki halidir. Genel olarak kaplamanın ayrışmaya karşı düşük dirençli olduğunu gösterirler. Bitüm miktarının az olması, aşınma tabakasının kalınlığının az olması, ince malzeme miktarının ya çok az ya da çok fazla olması, alt tabakaların drenaj kabiliyetinin az olması gibi sebeplerden dolayı kaplamanın ayrışmaya karşı direnci düşük olmaktadır (Tunç, 2001).



Şekil 2.10. Kaplamada çukur (PavementInteractive, 2021c)

2.2.2.2.3. Kaygan Yüzeyler

Bu tip bozulmaların meydana gelmesine sebep olan üç ana etmen vardır: agrega soyulması, agrega cilalanması ve bitümün terleme veya kusması. Kaygan yüzeylerin oluşumu özellikle yağışlı havalarda taşıtların güvenle durabilecekleri fren mesafesini uzatmakta ve güvenlik açısından önemli bir tehlike açığa çıkarmaktadır (Tunç, 2001).

Su, kil ve trafiğin sürtünme etkisiyle agrega üzerindeki ince bitüm filminin kopması olayına soyulma adı verilir. Bu durumu önlemek için mutlaka kullanılan agrega yüzeyinin temiz olması, bitüm miktarının az olmaması ve bitümün viskozitesinin yüksek olması gerekmektedir.

Zaman içerisinde trafiğin etkisiyle agrega yüzeyinin pürüzlülüğünü kaybetmesi olayına cilalanma adı verilir. Agreganın cilalanma direnci türüne bağlıdır. Örneğin, kalker türü agregalar trafik yükleri altında daha kolay cilalanmaktadır. Bu sebeple, cilalanma olayının önüne geçmek için agrega türünün seçiminde yüksek cilalanma direnci olan agrega tercih edilmelidir.

Kaplama içindeki bitümün yukarıya doğru hareket etmesine terleme veya kuma adı verilir. Yüzeğe ulaşan bitüm, yüzeğe bir bitüm filmi meydana getirir. Genellikle çok sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin fazla olduğu yollarda görülür. Karışımda aşırı miktarda bitüm bulunması, hava sıcaklığının yüksek olması, bitümü ısıya karşı duyarlılığının yüksek olması, karışımda boşluk miktarının az olması, bitümün penetrasyonunun çok yüksek olması gibi sebeplerden dolayı kaplamada kuma oluşabilir.



Şekil 2.11. Kaplamada kuma-terleme (PavementInteractive, 2021a)

2.2.2.3. Çatlamalar

Çatlamalar, trafik, çevre ve iklim etkisiyle kaplama yüzeyinde farklı şekil, genişlik ve derinlikte meydana gelen bozulmalardır. Stabilite çatlakları, yorulma çatlakları ve yansıma çatlakları olmak üzere üç farklı sınıfta incelenebilirler. Trafik yükleri etkisiyle kaplamanın alt yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmelerin kaplama tabakasının çekme mukavemetini aşmasıyla alt yüzeyden üst yüzeye doğru genişleyerek yayılan bozulmalar stabilite çatlaklarıdır. Trafik yüklerinin tekrarlı geçişi ile kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması durumunda meydana gelen bozulmalar yorulma çatlaklarıdır. Yansıma çatlakları ise kabaca, yüzeyinde çatlaklar bulunan bir kaplama üzerine takviye tabakası ve benzeri başka bir tabakanın inşa edilmesi durumunda altta kalan tabakadaki çatlakların üstteki tabakaya yansıması ile meydana gelen çatlaklardır (Tunç, 2001).

2.2.2.3.1. Timsah Sırtı Çatlaklar

Bu tipteki çatlaklar birbirleriyle bağlantılı haldedir ve biçimsel olarak timsah sırtını andırdıkları için bu şekilde isimlendirilmişlerdir. Kaplamanın tamamında ya da belirli kesimlerinde meydana gelmeleri mümkündür. Eğer sadece kaplamanın belirli kesiminde mevcutsa stabil olmayan zemin veya alttemel tabakasındaki aşırı oturmalarından kaynaklanırlar. Başka bir deyişle stabilitenin yetersizliğinden dolayı görülürler. Eğer kaplamanın tamamında veya büyük bir kesiminde mevcutsa aşırı trafik yükü ve tekerrüründen kaynaklanırlar. Başka bir ifadeyle kaplamanın yorulma dayanımının aşılmasından dolayı meydana gelirler. Buradan anlaşılacağı üzere, timsah sırtı çatlakları stabilite ve yorulma kaynaklı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Yorulma kaynaklı timsah sırtı çatlaklar genellikle düzgün dağılımlı ve küçük boyutlu olurken oturma kaynaklı timsah sırtı çatlaklar sivri köşeli, düzensiz ve büyük boyutlu olurlar (Tunç, 2001).



Şekil 2.12. Kaplamada timsah sırtı çatlaklar (RocciesAsphalt, 2021)

2.2.2.3.2. Kenar Çatlakları

Bu tür bozulmalar iki farklı şekilde meydana gelebilir. Bunlardan ilki banket kenarlarından 30-50 cm içeride sürekli ve boyuna geniş bir çatlak ile birlikte banketlere doğru dallanan yanıl kılcal çatlakların olması veya olmaması ile meydana gelen çatlaklardır. Diğer bir şekli ise kaplama ile banket arasında meydana gelen derin ve geniş çatlaklardır. İlk türün oluşma sebepleri; banketin yanıl desteğinin yetersiz olması, banketlerin oturması, yetersiz banket drenajından kaynaklı don kabarması, büzülme gibi hacim değişimleri vb. şeklinde sıralanabilir. Diğer türün oluşma sebepleri ise; yetersiz drenaj, büzülme (yol boyundaki ağaç ve bitkilerin su emmesi ile zeminde hacim değişikliği), kaplama ile banketler arasındaki nem farklılığından kaynaklı üniform olmayan stabilite vb. şeklindedir. Buradan da anlaşılacağı üzere çatlağın meydana gelme sebebi ortaya çıkacağı yeri de belirtmektedir (Tunç, 2001).



Şekil 2.13. Kapslamada kenar çatlakları

2.2.2.3.3. Ek Yerleri Çatlakları

Bu tip bozulmalar, yol genişliğinin yüksek olduğu yerlerde tek seferde finişer ile kaplama seriliminin gerçekleştirilemediği boyuna eklerin mevcut olduğu yerlerde ve mesai sonlarından serim tamamlanınca enine eklerin meydana geldiği yerlerde görülür. Genellikle, yetersiz sıkıştırma ve uygun olmayan işçilik sebebiyle oluşurlar. Serim ve sıkıştırma esnasında titizlikle çalışma gerçekleştirilirse bu tip bozulmalar önlenecektir (Tunç, 2001).



Şekil 2.14. Kapslamada derz çatlağı (PavementInteractive, 2021b)

2.2.2.3.4. Kayma (Ötelenme) Çatlakları

Bu tip bozulmalar, trafik etkisiyle meydana gelen yatay yüklemeler sonucu kaplama tabakalarının birbiri üzerinden kaymaları sonucu oluşur. Bu tip çatlamlar şekil olarak parabolü andırmakla birlikte yığılmalar halinde görülürler. Yatay ve düşey eğimler, kavşaklar ve küçük yarıçaplı kurplar gibi yol kesimlerinde meydana gelmeleri muhtemeldir. Genellikle; tabakalar arası adezyonun (bağ kuvvetinin) yetersiz olması, kaplama kalınlığının düşük olması, ağır taşıtların fazla olması ve frenleme olayının yoğun olması gibi nedenlerden dolayı meydana gelirler (Tunç, 2001).



Şekil 2.15. Kaplamada kayma çatlacağı (PavementInteractive, 2021f)

2.2.2.3.5. Yansıma Çatlakları

Eğer bozulmuş bir kaplama üzerine takviye tabakası olarak ya da bozulmuş bir rijit kaplama üzerine ensek üstyapı inşa edilecekse alt kaplamada bulunan bozukluklar üste yansıyarak yansıma çatlaklarını meydana getirecektir. Kaplamanın altında mevcut olan bozulmalar zaman içerisinde yanal genişleme ve büzülme ile yaklaşık 45° eğimle kaplama yüzeyine çıkmaktadır. Bununla birlikte, trafik yükleri de çatlama tabaka üzerinde düşey yükler yaratarak çatlakların büyümesine yardımcı olmaktadır. Alt tabakadaki çatlaklarda veya rijit kaplama derzlerinde oluşa yatay ve/veya rijit kaplama derzlerinde düşey hareketler üst tabakada yırtılmalara ve bunu takiben yansıma çatlaklarına neden olur (Tunç, 2001).

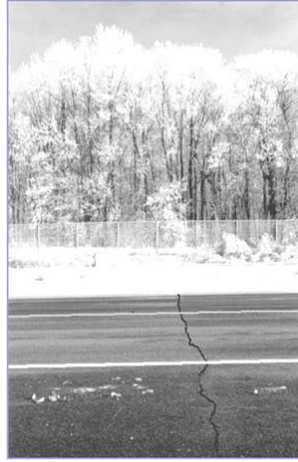


Şekil 2.16. Kaplamada yansıma çatlacağı (PavementInteractive, 2021e)

2.2.2.3.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları soğuk havalarda kaplamanın büzülmesi sebebiyle meydana gelir. Dolayısıyla diğer çatlama türlerinden en büyük farkı trafik etkisiyle bir bağlantısının olmayışıdır. Oluşmasında en büyük etmen iklimdir. Soğuk havalarda görülen büzülmeler kaplamada çekme gerilmeleri oluşturur ve bu gerilmeler kaplamanın çekme dayanımı aştıklarında kaplama düşük sıcaklık çatlakları meydana gelir (Tunç, 2001).

Düşük sıcaklık çatlaklarını kaplama yüzeyinde oluşan ve kaplamanın tamamında oluşan düşük sıcaklık çatlakları olarak iki ayrı sınıfta incelemek mümkündür. Kaplama yüzeyinde oluşan kılcal çatlaklar bitümün ısı etkisiyle büzülerek yarattığı çekme gerilmeleri ile meydana gelirken kaplamanın tamamında oluşan çatlaklar ise zeminin don etkisiyle kabarması sonucu oluşan gerilmelerden dolayı meydana gelir (Tunç, 2001).



Şekil 2.17. Kaplamada düşük sıcaklık çatlakları (Minnesota DOT, 2021)

Bu tipteki çatlamlar kaplamanın enine doğrultuda eşit veya eşite yakın aralıklarda meydana gelirler. Bunun sebebi kaplamanın ana büzülme hattının boyuna doğrultuda olmasıdır. Bununla birlikte, bölgede meydana gelen sıcaklık değişimlerinin sıklığı, çatlakların boyutunun ve genişliğinin zamanla artmasına sebebiyet verir (Tunç, 2001).

Düşük sıcaklık çatlaklarının oluşmasında öneme sahip bir diğer faktör de bitümün penetrasyonu ve ısıya karşı duyarlılığıdır. Kaplamanın inşasında çok düşük penetrasyon değerine sahip sert bir bitüm ile ısı duyarlılığı oldukça yüksek bir bitüm kullanılması halinde düşük sıcaklık çatlaklarının görülmesi kaçınılmaz olacaktır.

Düşük sıcaklıklarda, bitüm çekme gerilmeleri etkisi altında aşırı rijit davranırsa hemen hemen hiç deformasyon göstermeden gevrek kırılma sergiler. Bu sebeple, soğuk iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerde kaplama inşa edilirken yüksek penetrasyonlu ve ısıya az duyarlı bir bitümün kullanılması, düşük sıcaklık çatlaklarının önlenmesine veya en azından geciktirilmesine yardımcı olacaktır (Tunç, 2001).

Yukarıda ifade edilen sebeplerle birlikte kaplama yaşlandıkça, kalınlığı azaldıkça ve zeminin ısıya duyarlılığı arttıkça düşük sıcaklık çatlaklarının meydana gelme ihtimali artmaktadır. Bazı zeminler don ısısında büzülme sergiler ve buna zeminin ısıya duyarlılığı adı verilir. Genel olarak zemin içerisinde fazla miktarda su mevcutsa don sıcaklığında zemin genişir ve bu durum kaplamada çatlamalara sebep olur. Kaplamanın yaşlanması ise bitümün sertleşmesi anlamına gelir. Sertleşen bitüm ise rijit davranarak düşük sıcaklıklarda kaplamada meydana gelen büzülmeler ayak uyduramayıp çatlamalara sebebiyet verir. Bunlarla birlikte, ısı değişikliklerinin tekerrür sayısının artması da düşük sıcaklık oluşum riskini arttıran bir husustur (Tunç, 2001).

Yukarıda bahsedilen hususlar doğrultusunda düşük ısı çatlaklarının oluşumunda etkili olan faktörler Tablo 2.4’de özet halinde verilmiştir.

Tablo 2.4. Düşük ısı çatlaklarının oluşumunda etkili olan faktörler (Tunç, 2001)

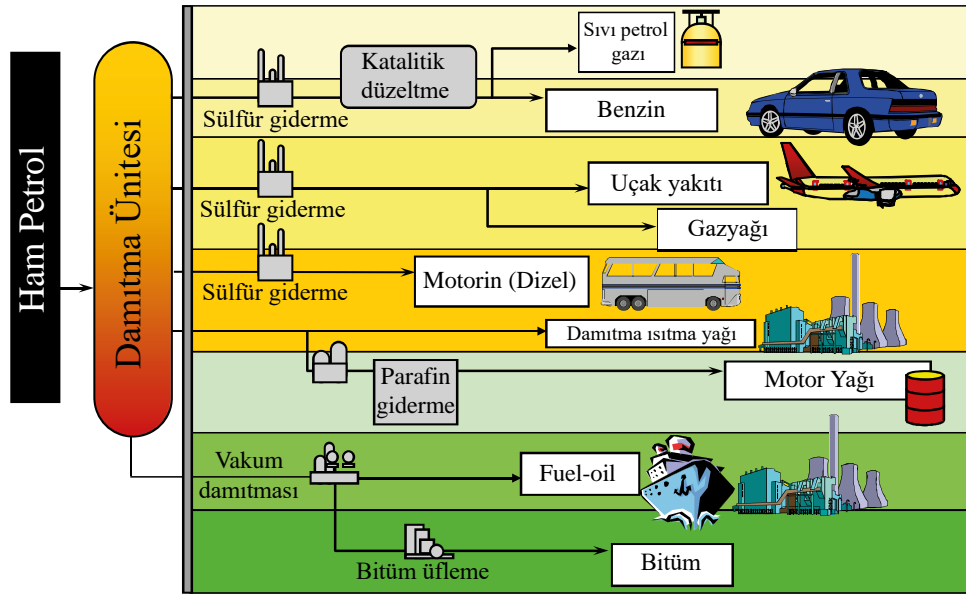
Bitüm	Isıya duyarlılık Yaşlanma Penetrasyon a/c oranı
Karışım	Rijitlik Çekme dayanımı Isıl genişleme katsayısı
Çevresel faktörler	Sıcaklık Yıllık sıcaklık farkı ve ısınma soğuma tekerrürleri
Diğer	Kaplama kalınlığı Tabakalar arası sürtünme kuvveti

Düşük sıcaklık çatlakları aşınma tabakasının üstünden başlayıp altına doğru ilerlerken yorulma çatlakları altından başlayıp üstüne doğru ilerlemektedir.

Tekerlek izi, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlakları BSK’larda en çok karşılaşılan bozulmalar olmakla birlikte diğer bozulma türleri uygun dizayn ve imalat ile önlenebilirken bu türlerin önlenmesi mümkün değildir. Son dönemlerde geliştirilen karışım tasarım yöntemleri bu üç kusurun en aza indirgenmesini amaçlamaktadır (Tunç, 2001).

2.3. Bitüm

Bitüm kelimesi için TDK'nın sözlüğüne bakıldığında “keskin bir koku, alev ve koyu duman çıkararak yanan, karbon ve hidrojen bakımından çok zengin doğal yakıt maddelerinin genel adı, yer sakızı” şeklinde tanımlandığı görülür (TDK, 2021). Bu tanımlı, bilimsel olacak şekilde, biraz daha genişletmek mümkündür. Bitüm, ham petrolün rafine edilmesi sırasında ham petrol içerisindeki sıvı petrol gazı, benzin ve dizel gibi hafif fraksiyonların çıkarılmasıyla elde edilen bir hidrokarbon ürünüdür (Hunter vd, 2015). Şekil 2.18’de bitüm üretimi ile ilgili süreç şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Ham petrol damıtma işleminin şematik gösterimi (Hunter vd, 2015)

Bitüm üzerine yapılan çalışmalarda bir terminoloji ayrılığı söz konusudur. Bu sebeple çalışmaları incelerken dikkatli olmak gerekir. BSK içerisindeki bağlayıcı maddeye “bitüm” denildiği, kaplamaya ise “asfalt” denildiği durumlar mevcutken bağlayıcı maddeye “asfalt”, kaplamaya ise “asfalt kaplama” denilen çalışmalar da mevcuttur. Bununla birlikte, “bitüm”, “asfalt”, “asfalt çimentosu” ve “asfalt bağlayıcı” kelimeleri sıklıkla birbirleri yerine kullanılır. Bu çalışmada, bağlayıcı madde için “bitüm”, kaplama için ise “bitümlü sıcak karışım, BSK” kullanılmıştır.

BSK’lar agrega ve bitümün karıştırılması ile hazırlanırlar. Bitüm, BSK’nın ağırlıkça sadece %5-7’sini, hacimce yaklaşık %15’ini oluşturmasına rağmen kaplamanın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Tunç, 2001). Bu tez kapsamında bitümün kaplama üzerindeki etkisi göz önüne alınarak bitüm

performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, bitüm için ayrı bir bölüme yer verilmiş ve bu bölümün alt başlıklarında bitümün kimyasal ve reolojik yapısı detaylı olarak anlatılmıştır.

2.3.1. Bitümün Kimyası

2.3.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi

Bitüm, doğrusal alifatik, siklo-alifatik (sarmal alifatik) ve aromatik türevlerden oluşan organik bileşiklerin karışımıdır. Doğrusal alifatik bileşikler doymuş doğrusal karbon bileşikleridir ve bunlara örnek olarak n-heptan gösterilebilir. Sarmal-alifatik bileşikler, doymuş karbon atomlarından oluşan halkalı yapılar (örneğin, sikloheksan) veya az sayıda doymamış gruplar içeren sarmal yapılardır (örneğin, sikloheksen). Aromatik bileşikler ise en az bir aromatik halkaya sahip bileşiklerdir (örneğin, benzen). Moleküller arası etkileşim ve diğer moleküllerin seyreltme etkisi bitümün özellikleri üzerinde değişime sebep olur. Geniş bileşik yelpazesi ve bu bileşiklerin bitümden bitüme değişen doğası, bunların bireysel izolasyonunu ve tanımlanmasını oldukça zorlaştırır. Bu sebeple, bitümler bireysel olarak tanımlanmaktan ziyade belirli yöntemler kullanılarak sınıflandırılır. Bu doğrultuda, bitümler çözünürlüklerine, polarlıklarına ve hidrodinamik boyutlarına göre sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan ise bitümün çözünürlüğe göre sınıflandırılmasıdır (Hunter vd, 2015).

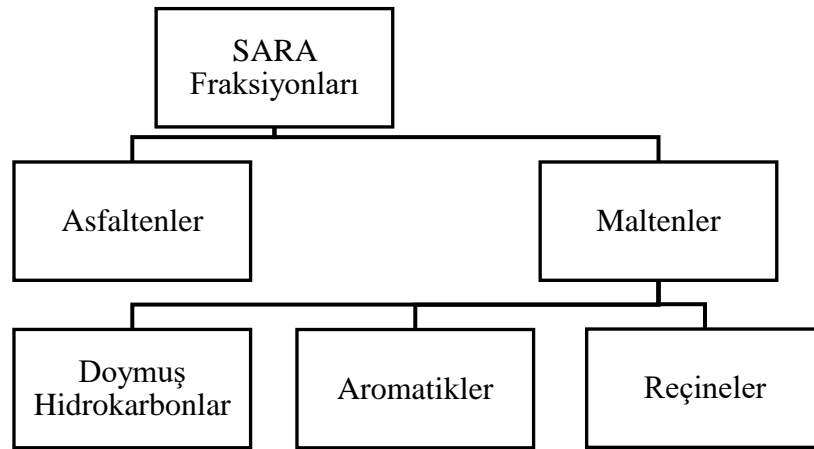
Bitümü içinde barındırdığı elementlere göre incelediğimizde, çoğunlukla hidrokarbon moleküllerinden ve biraz sülfür, nitrojen ve oksijen içeren hetero-sarmal türler ve fonksiyonel gruplardan oluştuğu görülür (Romberg vd, 1959). Bunların yanında, çok az miktarlarda nikel, vanadyum, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi metal atomlarını da içerir. Farklı rafinerilerde üretilen bitümlerin elemental analizlerine göre aşağıdaki tablo elde edilmiştir (Hunter vd, 2015).

Tablo 2.5. Bitüm içerisinde bulunan elementler

Element Adı	Bitüm İçerisindeki Yaklaşık Yüzdesi
Karbon	%82-88
Hidrojen	%8-11
Oksijen	%0-1.5
Sülfür	%0-6
Nitrojen	%0-1

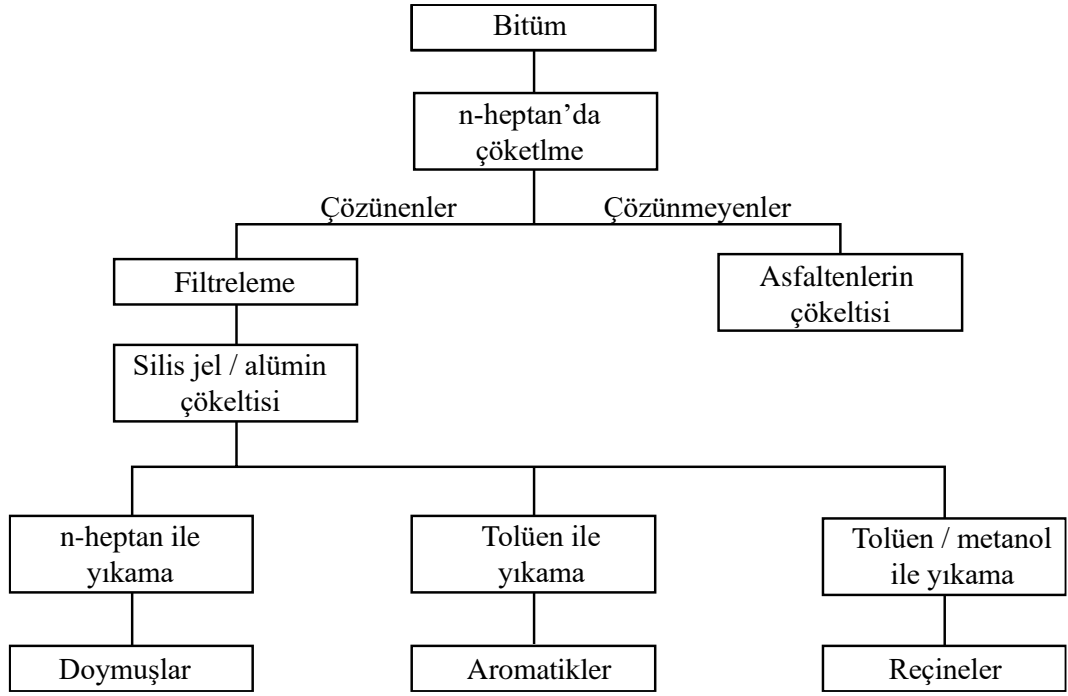
Bitümün kesin kompozisyonu üretildiği rafineriye, karıştırma esnasında ilave edilen kimyasal modifikasyona ve hizmet ömründeki yaşlanmaya göre değişiklik gösterir. Bu sebeple, bitümün kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşıktır.

Bitümler genel olarak, “asfaltener (*asphaltanes*)” ve “maltenler (*maltanes*)” olmak üzere iki ana kimyasal gruba ayrılırlar. Ayrıca, maltenler de kendi içerisinde üç ayrı gruba ayrılır: “doymuşlar/doymuş hidrokarbonlar (*saturates*)”, “aromatikler (*aromatics*)” ve “reçineler (*resins*)”. Her ne kadar bu gruplar birbirlerinden kesin sınırlarla ayrılmamış olsalar da en mantıklı sınıflandırma yöntemidir. Bu gruplar ile ilgili bir diyagram aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. SARA fraksiyonları

Çözünürlük esaslı sınıflandırma sonucunda bitüm yukarıda belirtilen gruplara ayrılır. Bu grupların İngilizce isimlerinin baş harflerinin yan yana dizilimi ile SARA (*Saturates, Asphaltanes, Resins, Aromatics*) kelimesi elde edilir ve genellikle bu gruplandırma bitümün SARA fraksiyonları olarak anılır. Bitümün çözünürlük esaslı sınıflandırılmasında genellikle kromatografik teknikler kullanılır. Bu yöntemlerin temeli, başlangıçta asfaltenerleri n-heptan kullanılarak çökeltilmesi ve ardından kalan bileşenlerin/fraksiyonların kromatografik olarak ayrılmasıdır. Şekil 2.20’de şematik olarak bitümün fraksiyonlara ayrılma işlemi gösterilmiştir.



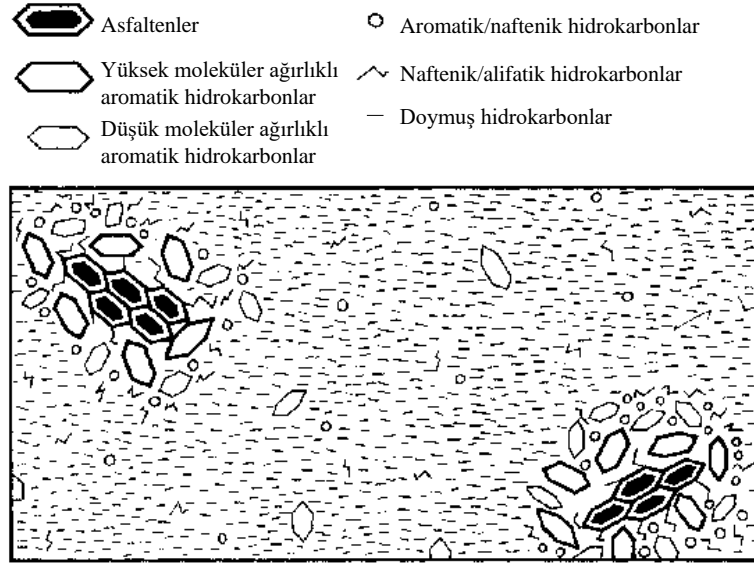
Şekil 2.20. Bitümün SARA fraksiyonlarına ayrılmasında izlenen yol (Hunter vd, 2015)

Doymuş hidrokarbonlar (doymuşlar), doğrusal veya dallanmış zincir şekilli alifatik hidrokarbonlar ve sarmal alifatik bileşikleri içerirler. Saman renkli veya renksiz olurlar. Polar olmayan viskoz yağlardır. Bitümün yaklaşık %5-20'sini oluştururlar. Aromatikler, doymamış halka sistemlerine bağlı polar olmayan karbon zincirlerinden oluşurlar. Koyu kahve renkli viskoz sıvılardır. Bitümün yaklaşık %40-65'ini oluştururlar ve inceltirilmiş asfaltın için dağılım fazını meydana getirirler. Reçineler, büyük oranda hidrojen ve karbondan oluşurlar. Bununla birlikte, az miktarda nitrojen, sülfür ve oksijen atomlarını da bünyelerinde barındırırlar. Koyu kahve renkli, katı veya yarı katı haldedirler. Yapıca polar olmakla birlikte oldukça yüksek adezyona sahiptirler. Bitümün yaklaşık %15-25'ini oluştururlar. Bitümün çözelti (*solution, sol*) veya jelatinimsi (*gelatinous, gel*) karakterde olması reçine/asfaltın oranına bağlıdır. Asfaltınler, karbon ve hidrojen atomlarının yanında az miktarda nitrojen, sülfür ve oksijen atomlarını da bünyelerinde barındırırlar. Siyah veya kahve renkli olup n-heptanda çözünmezler. Amorf yapılı katı maddelerdir ve yüksek derecede polardır. Bitümün yaklaşık %5-25'ini oluştururlar. Asfaltın miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Asfaltın yüzdesi arttıkça bitüm sertleşir, daha viskoz hale gelir, penetrasyon değeri düşer ve yumuşama noktası artar.

2.3.1.2. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bitüm, genellikle, yüksek moleküler ağırlıklı asfalten misellerinin (taneciklerinin), düşük moleküler ağırlıklı malten ortamında dağılımından veya çözünümünden meydana gelen kolloidal sistemler olarak kabul edilir. Burada, misel olarak kabul edilen asfaltenlerin etrafında, stabilize edici bir çözücü tabaka görevi üstlenen aromatik reçineler bulunur. Miselin merkezinden dışına doğru gidildikçe kademeli olarak daha az polar olan aromatik reçinelere geçiş olur. İlerlemeye devam edildikçe daha az aromatik olan yağlı yayılma (dispersiyon) ortamına geçilir (Hunter vd, 2015).

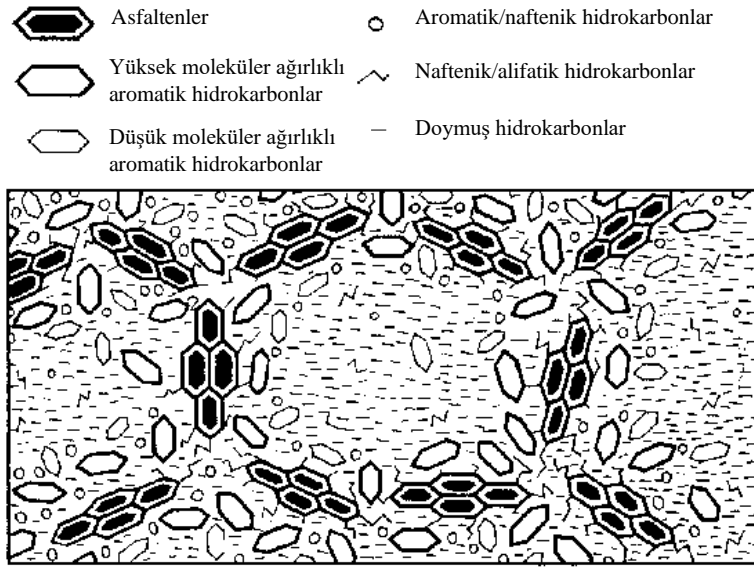
Bitüm içerisinde yeterli miktarda reçine ve aromatik varsa ve bunlar yeterli derecede çözücülüğe sahipse asfaltenler tamamen inceltilir. Bu durum, misellerin bitüm içerisinde rahatlıkla hareket etmesini sağlar. Bu tip bitümler “sol-tipi (*sol-type*)” olarak adlandırılır ve Şekil 2.21’de temsili yapıları gösterilmiştir (Hunter vd, 2015).



Şekil 2.21. Sol-tipi bitüm yapısı (Hunter vd, 2015)

Eğer bitüm içerisinde yeterli miktar aromatik ve/veya reçine fraksiyonu bulunmaz veya yeterli miktarda bulunmalarına rağmen çözme kabiliyetleri düşük ise asfaltenler inceltilemez. Bu durumda, asfaltenler arasındaki etkileşim fazlaşır. Böylece asfalten miselleri arasında düzensiz bağlantılar oluşur. Bu tip bitümler “jel-tipi (*gel-type*)” olarak adlandırılır ve Şekil 2.22’de temsili yapıları gösterilmiştir. Bu tür bitümlerin en iyi örnekleri çatı kaplama işlerinde kullanılan

oksitlenmiş bitümlerdir. Uygulamada kullanılan bitümler karakteristik olarak sol-tipi ve jel-tipi bitümlerin ortasındadır (Hunter vd, 2015).



Şekil 2.22. Jel tipi bitümün yapısı (Hunter vd, 2015)

Bitümdeki SARA fraksiyonlarının miktarları bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini de etkilemektedir. Sabit asfaltin miktarında:

- Aromatik miktarı arttıkça bitümün reolojik özelliğinin çok az etkilendiği, sadece kayma hassasiyetinin küçük bir miktar azaldığı
- Doymuş hidrokarbon miktarı arttıkça bitümün yumuşadığı
- Reçine miktarı arttıkça bitümün sertleştiği, penetrasyon indeksinin azaldığı, kayma hassasiyetinin azaldığı, viskozitenin arttığı belirlenmiştir (Hunter vd, 2015).

Tüm bu etkilerin yanında bitümün reolojisi üzerinde asıl etkili olan fraksiyon asfaltenerlerdir. Sabit sıcaklık koşullarında asfaltin miktarının artması bitümün viskozitesinin artırır. Bununla birlikte, sıcaklık yükseldikçe bitümde asfaltenerler arasındaki bağlantılar bozulur ve viskozite azalır. Ancak, sıcak bitümler soğuduğunda asfaltenerler arasındaki bağlar ve etkileşimler yeniden oluşur (Hunter vd, 2015).

2.3.2. Bitümün Reolojisi

Reoloji, gerçek malzemelerin gerilmelere karşı içsel tepkisinin incelenmesi ile ilgilenen disiplinler arası bir temel bilimdir. “Reoloji” kelimesi Yunancadan türetilmiştir ve “reo” akma veya akış, “loji” ise bilim olarak tercüme edilir; bu nedenle, “reoloji” tam anlamıyla “akma çalışması” anlamına gelir. Bununla birlikte, bitümün reolojisi ise genel olarak bitümün akma ve deformasyon özellikleri ile ilişkili temel

ölçümler olarak tanımlanabilir. Ayrıca, reoloji, hem katı hem de sıvı özellikler sergileyen malzemelerin incelenmesi olarak düşünülebilir (Hunter vd, 2015).

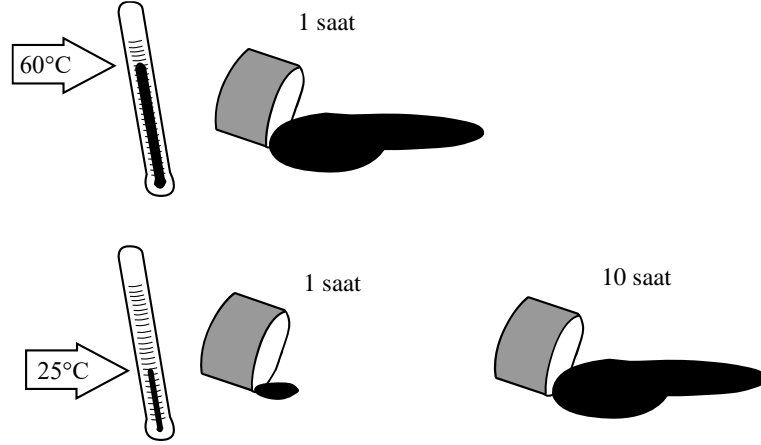
Deforme olmuş malzemenin, deformasyona neden olan kuvvetler ortadan kaldırıldığında orijinal şekline ve boyutuna dönme kabiliyeti “elastisite” olarak adlandırılır ve bu davranışı sergileyen malzemeler “elastik malzemeler” olarak adlandırılır. Çoğu katı malzemeler elastikliğe sahiptir ve nispeten küçük gerilmelere gösterilen tepki, doğru orantılı bir şekil değişmektedir. Bu ilişki 1660 yılında Robert Hooke tarafından gözlemlenmiştir ve Hooke yasası olarak adlandırılmaktadır. Hooke yasası, uygulanan F kuvvetinin, bir k sabiti ile yer değiştirmenin (veya uzunluktaki değişimin) çarpımına eşit olduğunu ifade eder: $F=kx$. K değeri sadece dikkate alınan elastik malzemenin türüne değil aynı zamanda boyutlarına ve şekline de bağlıdır. Bitüm ise düşük sıcaklıklarda elastik davranış sergiler (Hunter vd, 2015).

Hooke yasasındaki doğru orantıya sahip olma sınırı (orantılılık sınırı), bir malzemenin deforme olurken artık Hooke yasasının geçerli olmadığı nokta olarak tanımlanır. Bununla birlikte, elastik limit, yük altındaki malzemenin kalıcı olarak deforme olmaya başladığı nokta olarak ifade edilebilir. Bu limit aşıldıktan sonra, malzeme deformasyona sebep olan kuvvet ortadan kaldırıldığında kendi orijinal uzunluğuna geri dönemez. Bu, plastik davranışın başlangıcını işaret eder. Gevrek malzemelerin çoğu için, elastik sınırın ötesindeki gerilmeler neredeyse hiç plastik deformasyonu olmayan bir kırılma ile sonuçlanır (Hunter vd, 2015).

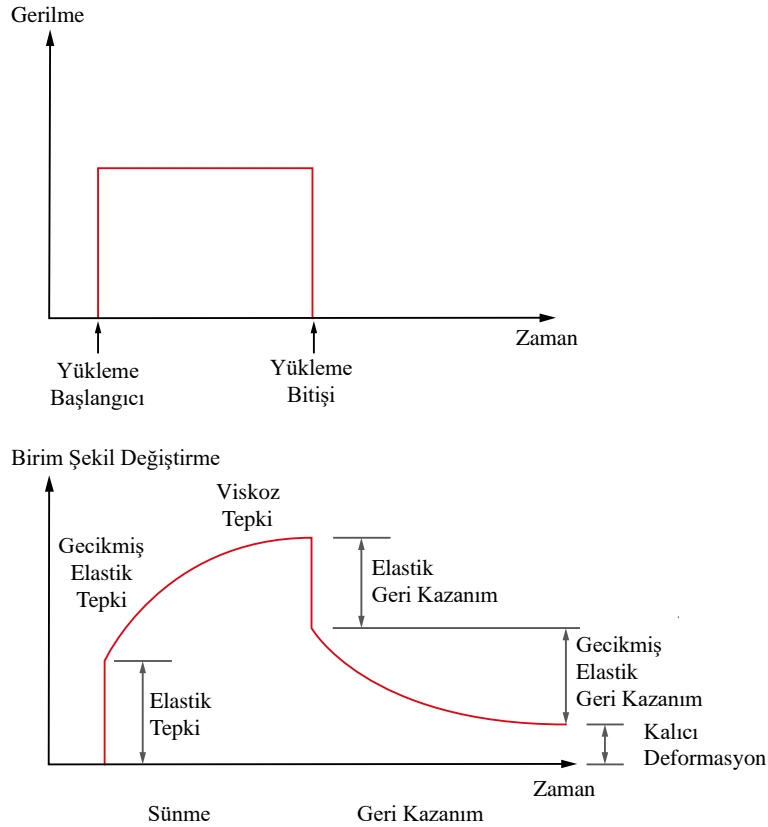
Viskozite bir sıvının akmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür ve uygulanan kayma gerilmesinin kayma şekil değiştirmesi hızına oranı olarak belirlenir. Viskozite için SI birimi Pascal saniyedir (Pa·s). Bitüm de dâhil olmak üzere tüm basit sıvıların viskozitesi artan sıcaklıkla azalır. Birçok günlük sıvı Newtoniyen davranış olarak adlandırılan davranışı sergiler. Newtoniyen davranışta ortaya çıkan gerilmeler, bölgesel şekil değiştirme oranıyla doğru orantılıdır. Ayrıca, bu davranışı gösteren sıvılarda viskozite deformasyon hızından bağımsızdır. Yeterince yüksek bir kayma hızında ise tüm sıvılar Newtoniyen olmayan davranış sergilemektedirler (Hunter vd, 2015).

Bitüm, düşük sıcaklıkta ve/veya kısa yükleme süresinde cam benzeri elastik bir katı gibi; yüksek sıcaklıkta ve/veya yavaş yükleme süresinde viskoz bir akışkan gibi davranan termoplastik, viskoelastik bir sıvıdır. Bu nedenle bitümün gerilmeye tepkisi

hem sıcaklığa hem de yükleme süresine bağlıdır ve sonuç olarak bitümün reolojisi, gerilme/şekil değiştirme/zaman/sıcaklık tepkisi ile tanımlanır (Hunter vd, 2015). Şekil 2.23'te bitümün akma davranışının daha kolay anlaşılmasını sağlayan bir görsel verilmiştir. Şekil 2.24'te ise sabit yük altındaki viskoelastik bir malzemenin genel gerilme-şekil değiştirme diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.23. Bitümün akma davranışı (McGennis vd, 1994)



Şekil 2.24. Viskoelastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı (Hunter vd, 2015)

Bir malzemenin viskoelastik analizini yapmak için dinamik kayma reometresi (DSR) kullanılabilir. Bu yöntem, bitümün reolojik özelliklerini ölçmede kullanılan

yaygın bir tekniktir. Bu tür deneylerde, bir numuneye sinüzoidal bir şekil değiştirme uygulanır ve ortaya çıkan gerilme, frekansın bir fonksiyonu olarak gözlemlenir. Buna “şekil değiştirme kontrollü deney” denir ve bitüm için sinüzoidal değişken bir gerilmenin uygulandığı ve şekil değiştirme tepkisinin ölçüldüğü gerilme kontrollü yaklaşımdan daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir malzeme zamanın bir fonksiyonu olarak bir şekil değiştirme veya gerilmeye maruz kalırsa ve gerilme yeterince küçükse, o zaman lineer viskoelastik bir şekilde davranacaktır, yani kesme gerilmesi ve şekil değiştirme arasında Hooke kanununda öngörüldüğü gibi doğrusal bir ilişki olacaktır (Hunter vd, 2015).

Bitüm için DSR deneyinde kullanılan yöntem, reometrenin paralel plakaları (diskleri) arasına sıkıştırılmış bitüm numunelerine bir salınımlı kesme olarak sinüzoidal şekil değiştirmeler uygulamaktır. Tepki gerilmesinin büyüklüğü, uygulanan şekil değiştirmeye tepki olarak numuneden iletilen tork belirlenerek ölçülür (Şekil 2.25). Deney sırasında uygulanan şekil değiştirmeler, deneyin doğrusal viskoelastik bölgede kalmasını sağlamak için küçük tutulur. Şekil değiştirme taramaları, deneyin doğrusal viskoelastik bölgede meydana geldiğini doğrulamak için kullanılabilir. Şekil değiştirme, düşük sıcaklıklarda genellikle %0.5'in altında olmalıdır, ancak daha yüksek sıcaklıklarda artırılabilir (Hunter vd, 2015).

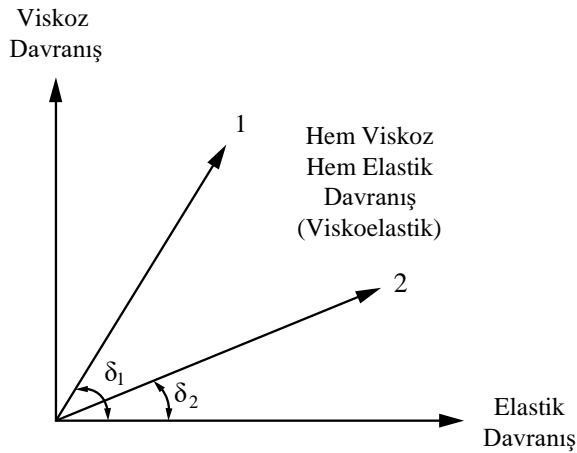


Şekil 2.25. Gerilme tepkisi ve şekil değiştirme ilişkisi (Hunter vd, 2015)

Uygulanan şekil değiştirmenin tepkisi, lineer viskoelastisite bölgesi (küçük şekil değiştirmeler) için sinüzoidal olan ve malzeme tepkisinin uygulanan şekil değiştirme fazından farklı olduğu bir gerilmedir. Bu faz farkı faz açısı (δ) olarak adlandırılır. Aynı zamanda, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz farkı olarak tanımlanır ve kayıp açısı veya faz gecikmesi olarak da adlandırılır. Faz açısı için alternatif bir sembol olan

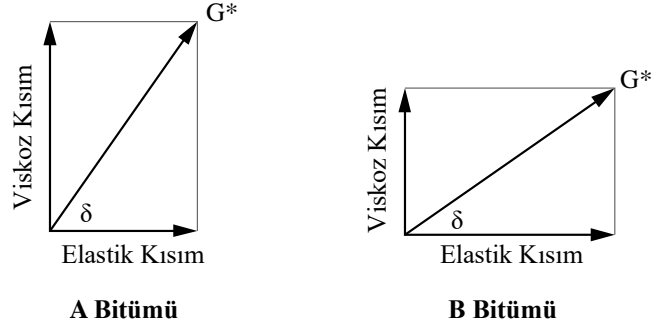
ϕ de kullanılabilir. Tamamen elastik malzemeler için faz açısı 0° olurken, tamamen viskoz malzemeler için 90° olacaktır. Bu nedenle faz açısı, bitüm gibi bir malzemenin viskoelastik özelliklerini tarif etmede büyük bir öneme sahiptir (Hunter vd, 2015).

Bitümün viskoz ve elastik davranışını daha iyi anlayabilmek için Şekil 2.26 incelenebilir. Yüksek sıcaklıklarda bitümler Şekil 2.26'daki dikey eksenle ifade edilen viskoz bir akışkan gibi davranır. Diğer yandan, çok düşük sıcaklıklarda bitümler Şekil 2.26'da yatay eksen ile gösterilen elastik bir katı gibi davranır. Bununla birlikte, BSK'ların hizmet ömrü sürecine maruz kaldığı sıcaklıklarda, bitümler Şekil 2.26'da 1 ve 2 numaralı oklarla gösterilen viskoelastik davranışı sergilerler. Ancak, Şekil 2.26'daki iki bitüm de viskoelastik davranış sergilese bile, 2 numaralı bitüm daha küçük δ 'ya sahip olduğundan 1 numaralı bitümden daha elastiktir (McGennis vd, 1994).



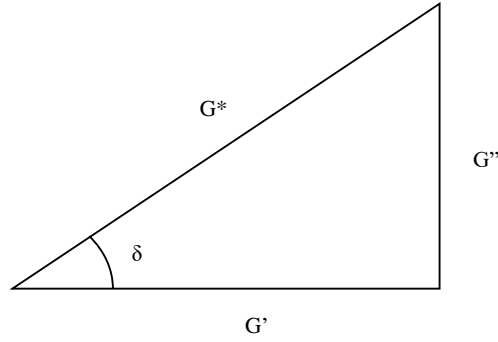
Şekil 2.26. Bitümün viskoelastik davranışı

Faz açısının önemini daha net bir şekilde anlamak için Şekil 2.27 incelenmelidir. Bu şekilde DSR deneyi sonucunda aynı G^* değerlerine, fakat farklı δ değerlerine sahip iki bitüm numunesi temsili olarak gösterilmiştir. Şekilde G^* 'ı gösteren vektörün büyüklüğü iki bitüm için de aynıdır. Fakat A bitümünün δ değeri B'ninkinden daha büyüktür. Bu durum A bitümünü viskoz davranışa, B bitümünü ise elastik davranışa daha yakın hale getirir. Başka bir ifadeyle, iki bitüme de aynı sürede aynı büyüklükteki yük uygulanacak olursa, A bitümü B bitümünden daha fazla kalıcı deformasyon gösterecektir. Bu örnek, bitümün reolojik özelliğinin belirlenmesinde sadece G^* 'ın yeterli olmadığını, δ 'ya da ihtiyaç duyulduğunu belirtmektedir (McGennis vd, 1994).



Şekil 2.27. Bitümün reolojisinde faz açısının önemi (McGennis vd, 1994)

Elde edilen gerilmenin uygulanan şekil değiştirmeye oranı, kompleks kayma modülü (G^*) olarak adlandırılır ve ayrıca karmaşık modül, kayma modülü veya basitçe rijitlik olarak da isimlendirilir. Karmaşık modülün değeri bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökünden hesaplandığından, bir vektörün büyüklüğüne benzer (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. G^* ile G' ve G'' arasındaki ilişki (Hunter vd, 2015)

G^* 'ın faz içi bileşenine kayma depolama modülü (G') veya daha yaygın olarak depolama modülü denir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$G' = G^* \cos \delta \quad (2.1)$$

Depolama modülü, her bir salınımda elastik olarak depolanan ve salınan enerji miktarını açıklar ve bu nedenle de karmaşık modülün elastik modülü veya elastik bileşeni olarak da bilinir (Hunter vd, 2015).

G^* 'ın faz dışı bileşenine kayma kaybı modülü (G'') veya sadece kayıp modülü denir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (2.2)$$

Kayıp modülü, sürekli sabit salınımdaki ortalama enerji kaybı hızını tanımlar. Kayıp modülü, karmaşık modülün viskoz modülü veya viskoz bileşeni olarak da

adlandırılır. Depolama ve kayıp modülü, G' ve G'' , bazen sırasıyla elastik ve viskoz modül olarak yanlış yorumlanır. Aslında, tepkinin elastik bileşeni, depolama modülünün sadece bir bölümünü ve viskoz tepki, kayıp modülünün sadece bir bölümünü temsil eder. Buna ek olarak, viskoelastik malzemeler, zamana bağlı olan ancak tamamen geri kazanılabilen önemli miktarda gecikmiş elastik geri kazanım sergiler. Depolama ve kayıp modülünün her ikisi de gecikmiş elastik geri kazanımın bir kısmını yansıtır (Hunter vd, 2015). Kayıp tanjant, karmaşık modülün viskoz ve elastik bileşenlerinin oranı veya sadece faz açısının tanjantı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \quad (2.3)$$

Bitümün davranışı, üç farklı davranış bölgesinde incelenebilir, yani:

- düşük sıcaklıkta doğrusal elastik bölge
- yüksek sıcaklıkta viskoz bölge
- orta sıcaklıkta viskoelastik bölge

Doğrusal davranış, bitümün elastik bir katı gibi davrandığı düşük sıcaklıklarda ve kısa yükleme sürelerinde (yüksek frekanslar) meydana gelir. Doğrusallık, aynı zamanda, malzemenin neredeyse tamamen bir Newtoniyen sıvısı gibi davrandığı yüksek sıcaklıklarda ve uzun yükleme sürelerinde (düşük frekanslar) de (modifiye edilmemiş bitümler için) muhafaza edilmektedir. Doğrusal olmamanın ön plana çıktığı alan bu nedenle, ortalama sıcaklıklar ve ortalama yükleme süreleri aralığındadır. Bu sıcaklık aralığı ve yükleme süreleri, sahada yaşanan koşullara karşılık gelir (Hunter vd, 2015).

Bitümün düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin belirlenmesi için eğme kirişi reometresi (BBR) kullanılırken orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin belirlenmesinde DSR'den faydalanılmaktadır. Bu cihazların kullanılması ile yürütülen deneyler hakkında ilerleyen bölümlerde detaylı bilgi verilecektir.

2.4. Bitüm Modifikasyonu

BSK'larda kullanılan bitümler, geniş bir sıcaklık rejimi aralığında yeterli performans göstermelidirler. Bitüm, kış aylarındaki düşük sıcaklıklarda oluşan ani gerilmelere karşı çatlamadan dayanacak kadar esnek kalmalı ve bununla birlikte yaz

aylarındaki yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı direnç gösterecek kadar sert olmalıdır (Topal vd, 2011). Geleneksel bitüm kullanılarak inşa edilen BSK'lar, çoğu karayolu kaplamalarında ve havaalanı pisti uygulamalarında tatmin edici bir performans sergilemiştir (Airey, 2002). Ancak, karayolu trafiğinin hacmindeki, dingil yüklerindeki ve tekerlek lastiklerinin basınçlarındaki artış, yetersiz bakım yapılması, iklim koşullarının değişmesi ve inşaat ve tasarım hataları asfalt kaplamaların bozulmasına sebep olarak hizmet ömrünü olumsuz etkilemektedir (Airey, 2002; Isacsson ve Lu, 1995; Suo ve Wong, 2009; Tayfur vd, 2007). Bunun yanı sıra, yaşam standartlarındaki artış, sosyal gelişme, mevcut kaynakların yetersizliği ve artan malzeme ve enerji maliyeti karayolu mühendislerini yeni yollar inşa etmeye ve mevcut yolları iyileştirme konusunda yeni alternatifler keşfetmeye yöneltmiştir (Al-Hadidy ve Tan, 2009; Sengoz ve Topal, 2005; Yılmaz vd, 2011). Bitüm modifikasyonu, bitümün eksikliklerini gidermek ve böylece asfalt kaplamaların performansını arttırmak için bir çözüm sunmaktadır (Isacsson ve Lu, 1995).

2.4.1. Tarihsel Açıdan Polimerlerle Bitüm Modifikasyonu

Bitüm modifikasyonu köklü bir geçmişe sahiptir. Henüz rafine bitüm üretilmeden önce bile, insanlar doğal bitümü doğal kauçuk ile modifiye etmişler ve bununla ilgili patent almışlardır (Isacsson ve Lu, 1995; Yidirim, 2007). Bununla birlikte, bitüm modifikasyonunda sentetik polimerler II. Dünya Savaşı sona erene kadar yaygın bir şekilde kullanılmamıştır (Zhu vd, 2014).

En yaygın olarak kullanılan polimer gruplarının plastomerler ve elastomerler olduğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte, plastomerler diğer gruba kıyasla daha köklü bir geçmişe sahiptir. Halen popülerliğini devam ettirmekte olan plastomerlerin çoğu 1960'lardan önce ticari olarak üretilmeye başlanmıştır (Utracki, 1995). Elastomerlerde ise ilk ticari ürün olarak kabul edilen SBS, 1965 yılında ABD'de geliştirilmiş daha sonrasında ise ilk hidrojen ilaveli (doyurulmuş) ürün olan SEBS (stiren-etilen/bütülen-stiren) 1972 yılında üretilmiştir. Buna rağmen, bu ürünlerin ilk kullanım alanı bitüm modifikasyonu olmamıştır. Üretimlerinden sonra öncelikle ambalaj, kauçuk, ayakkabı veya yapışkan endüstrilerinde kullanılmışlardır (Zhu vd, 2014).

1980'li yıllarda kaplama tabakası kalınlığının azaltılması yönündeki talepler giderek artmıştır. Bu durum, araştırmacıların bitümün polimerler ile modifikasyonuna

odaklanmasına ve daha sistematik araştırmalar yayınlamasına sebep olmuştur (Zhu vd, 2014). Örneğin, 1980’de Piazza vd (1980), sırasıyla plastomerler ve elastomerler ile modifiye edilen bitümün özelliklerini ortaya çıkarmışlardır. Kraus (1982), elastomerler ile modifiye edilmiş bitümün morfolojisini incelemiş ve polimerlerin bitüm içerisinde şiştiğini bildirmiştir. Bowering (1984), polimerler ile bitümün modifiye edilmesinin gerekliliğini incelemiştir. Azalan tabaka kalınlığının ve uzayan kaplama ömrünün, polimer modifiyeli bitümlerin (PMB’lerin) yüksek maliyetinin üstesinden geleceğini iddia etmiştir. 1987’de ABD Kongresi, bitümün reolojisine vurgu yaparak hem geleneksel hem de modifiye bitüm için performans dayalı bir şartname geliştirmiştir. Böylece, PMB’nin popülerliğini arttıran Stratejik Otoyol Araştırma Programı (SHRP) kurulmuştur. Reese ve Predoehl (1989), Kaliforniya’da iki yıllık bir saha testinden sonra PMB’nin yaşlanmaya ve çatlamaya karşı direncinin iyi olduğunu bildirmişlerdir. Buna rağmen, modifikasyonun başarısı hakkında kesin sonuçların elde edilebilmesi için daha fazla değerlendirmenin yapılması gerektiğine dikkat çekmişlerdir.

1990’ların başında, bitümün polimerler ile modifikasyonuna yönelik araştırmalara olan ilgi artmıştır (Isacson ve Lu, 1995). Araştırmacılar, farklı PMB’lerin mekanik özelliklerini, reolojisini, sıcaklık hassasiyetini, morfolojisini, termal davranışını, depolama stabilitesini ve yaşlanmasını sistematik olarak araştırmıştır. Yaygın olarak kullanılan PMB’lerin hem avantajları hem de dezavantajları yavaş yavaş bulunmuştur. Bir taraftan, bitümlerin polimer ile modifiye edilmesinin elastik geri kazanımı, düşük sıcaklıklarda çatlama direncini ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır (Krutz vd, 1991; Stock ve Arand, 1993; Valkering ve Vonk, 1990). Diğer taraftan, bazı polimerlerin yüksek sıcaklıklarda depolamadaki kararsızlığı ve faz ayrışımı problemleri gibi dezavantajlar da kanıtlanmıştır (Lu vd, 1999; Wardlaw ve Shuler, 1992). Ayrıca, PMB’nin dezavantajlarının giderilmesine yönelik çalışmalar da yine 1990’lardan sonra başlamıştır. Giavarini vd (1996), polipropilen ile modifiye edilmiş bitüme polifosforik asit (PPA) ilave edilerek stabilitesinin arttırılabileceğini ifade etmişlerdir. Buna ilaveten, PPA’nın bitümün yapısını sol-tipinden jel-tipine değiştirerek PMB’nin depolama stabilitesini geliştirmeye yardımcı olabileceğine inandıklarını belirtmişlerdir.

2000 yılından sonra artık PMB ile ilgili araştırmalar iki alana bölünmüştür (Zhu vd, 2014):

- Polimer modifikasyon mekanizmasını ve hatlarını derinlemesine araştırmaya devam eden araştırmalar.
- Bazı PMB'lerin dezavantajlarını gidermeye yönelik araştırmalar.

Bu alanların birincisinde, PMB'nin mikroyapısına, deformasyonuna, çatlamasına, yaşlanmasına ve yorulmasına odaklanılmıştır. İkinci alanda ise PMB'lerin dezavantajlarının üstesinden gelmek amacıyla yeni yöntemler keşfedilmiştir.

2.4.2. Yaygın Olarak Kullanılan Polimer Katkı Malzemeleri

Daha önce ifade edildiği üzere, bitümün modifiye edilmesinde sentetik polimerlerin kullanımı II. Dünya Savaşı sonrasında başlamıştır. Günümüzde, bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan polimerler; plastomerler ve elastomerler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Zhu vd, 2014).

Bitüm endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan polimer grubu elastomerlerdir. Anyonik polimerizasyon ile üretilen stiren - bütadien - stiren (SBS) veya stiren - izopren - stiren (SIS) blok kopolimerleri bu grubun en önemli temsilcileridir (Jasso vd, 2015). Elastomerlerin bitüme ilave edilmesi durumunda, kopolimerin bütadien fazı, yağ fraksiyonlarının (yani maltenlerin) emilmesi ile şişer. Sonuç olarak, polimerin orijinal hacmi yaklaşık 4 ile 10 kat artar. Bu olay, bitüm karışımında üç boyutlu polimerik bir ağın geliştirilmesinin anahtarıdır; SBS, elastomerik özelliklerini tüm karışıma geçirir ve yüksek sıcaklıklarda erime kabiliyetini korur (Jasso vd, 2015). SBS modifiyeli bitümlerin reolojik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. SBS ile modifiye edilmiş bitümün mühendislik özellikleri gelişmiştir (örneğin, elastik geri kazanım oranı artmıştır ve daha düşük sünme rijitliği elde edilmiştir) (Isacsson ve Lu, 1999); bununla birlikte, bu polimerlerin karıştırılabilirlik ile ilgili bir ana dezavantajı vardır. Polimer ile bitüm arasındaki uyum düşük olduğundan yüksek sıcaklıklarda karıştırma işlemi olmaksızın depolandıklarında polimer fazı bitüm fazından ayrılma eğilimi gösterir. Bu durum, PMB'nin depolama stabilitesinin düşük olduğunu gösterir. Bununla birlikte SBS modifiyeli bitümler, temelde SBS polimerinin yüksek maliyeti nedeniyle, saf bitümlerden çok daha pahalıdırlar (Gama vd, 2018).

Elastomerlerden daha ucuz olduğu bilinen plastomerler, bağlayıcının rijitliğini arttırır ve kalıcı deformasyona karşı daha iyi bir direnç sağlar (Nunez vd, 2014; Xiao vd, 2014). Bu grubun örnekleri, polietilen (PE), etilen-vinil asetat (EVA), etilen-bütülakrilat (EBA) rasgele dizilimli kopolimerleridir (Polacco vd, 2004b). En yaygın şekilde, poliolefin olarak kategorize edilen PE ve polipropilen (PP) kullanılmaktadır. Poliolefin tek başına kullanılabilir veya yardımcı modifiye malzemesi olarak elastomerler ile karıştırılabilir. Modifiye malzemesi olarak poliolefinlerin kullanımının birincil dezavantajı faz ayrışımıdır. Perez-Lepe vd (2003), ağırlıkça %1-5 miktarında yüksek yoğunluklu polietilen (*High Density Polyethylene*, HDPE) ile modifiye edilmiş bitümleri incelemişlerdir. Deney sonuçları, HDPE'nin bitümün yüksek sıcaklık performansını arttırmasına rağmen, bu tür bir modifikasyonun asfalt kaplama uygulamalarında kullanılamayacak kadar düşük bir depolama stabilitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bitümün performans derecesini (*Performance Grade*, PG) arttırmak amacıyla bitüme plastomerlerin ilave edilmesi, oksidatif yaşlanmaya karşı daha hassas bağlayıcılar ortaya çıkarabilir ve sonuç olarak, asfalt kaplamanın çatlaklara karşı dayanımının düşmesine yol açabilir (Gama vd, 2018)

Tablo 2.6'da yaygın olarak kullanılan bazı polimerlerin avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir (Behnood ve Gharehveran, 2019). Her ne kadar bitüm polimer modifikasyonu alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiş olsa da Tablo 2.6'de gösterildiği gibi çeşitli dezavantajlarda mevcuttur. Araştırmacılar, bu dezavantajların giderilmesi amacıyla çeşitli yöntemler ve polimer kökenli olmayan katkı malzemelerini kullanmayı denemişlerdir. Bu yöntemlerin isimler, faydaları ve dezavantajları aşağıdaki Tablo 2.7'de özetlenmiştir.

Tablo 2.6. Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı polimerlerin avantaj ve dezavantajları (Behnood ve Gharehveran, 2019)

Polimer	Avantajları	Dezavantajları
SBS (Stiren - Bütadien - Stiren)	Tekerlek izi direncinde artış Yüksek sıcaklıkta akmada artış Düşük sıcaklıklarda esneklikte artış Sıcaklık hassasiyetinde düşüş Adezyon ve kohezyon kaynaklı bozulmalarda azalış Sertlikte artış Penetrasyon azalışı ve yumuşama noktası artışı	Nispeten yüksek maliyet Bazı bağlayıcılarla uyumluluk problemi Optimum bitüm içeriğinde artış Yanıcılıkta artış Isı, oksidasyon ve ultraviyoleye karşı nispeten düşük direnç Serilme sıcaklıklarında viskozitede artış
SIS (Stiren - İzopren - Stiren)	Yaşlanma direncinde artış Agrega-bitüm adezyonunda artış	Nispeten yüksek maliyet Bazı bağlayıcılarla uyumluluk problemi Isı, oksidasyon ve ultraviyoleye karşı nispeten düşük direnç
SBR (Stiren - Bütadien Kauçuğu)	Sıcaklık hassasiyetinde düşüş Viskoz akmaya karşı dirençte artış Kohezyonda artış Düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dirençte artış	Düşük yaşlanma direnci Uyumluluk problemi
SEBS (Stiren - Etilen / Bütilen - Stiren)	Isı ve oksidasyona karşı yüksek direnç	Nispeten yüksek maliyet Depolama stabilitesi problemi SBS'e kıyasla elastisitede düşüş
PE (Polietilen)	Tekerlek izi direncinde artış Yüksek sıcaklık performansında artış Yaşlanma direncinde artış Nispeten düşük maliyet Kırılma sertliğinde artış	Bitümle karıştırılması zor Faz ayrışımı ve stabilite problemi Fazla miktarlarda kullanım Elastik geri kazanımda yetersiz iyileşme Düşük sıcaklık performansında düşüş
EVA (Etilen - Vinil Asetat)	Tekerlek izi direncinde artış Sıcaklık hassasiyetinde düşüş Düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dirençte artış Yorulmaya karşı dirençte artış	Elastik geri kazanımda yetersiz iyileşme Düşük uyumluluk ve adezyon Düşük sıcaklık performansında önemsiz artış
EBA (Etilen Bütül Akrlat)	Tekerlek izi direncinde artış İyi depolama stabilitesi	Elastik geri kazanımda yetersiz iyileşme Düşük sıcaklık performansında önemsiz artış
PP (Polipropilen)	Yüksek sıcaklık performansında artış Nispeten düşük maliyet Yük direncinde artış Sıcaklık hassasiyetinde düşüş	Bitümde çözülmez Faz ayrışımı problemi Kristalleşmeye yüksek yönelim Elastik geri kazanımda yetersiz iyileşme Düşük sıcaklık performansında düşüş Bitüm karakterizasyon deneylerinde aşırı değişkenlik

Tablo 2.7. Polimer modifikasyonunun dezavantajlarını gidermede kullanılan bazı yöntemler (Behnood ve Gharehveran, 2019)

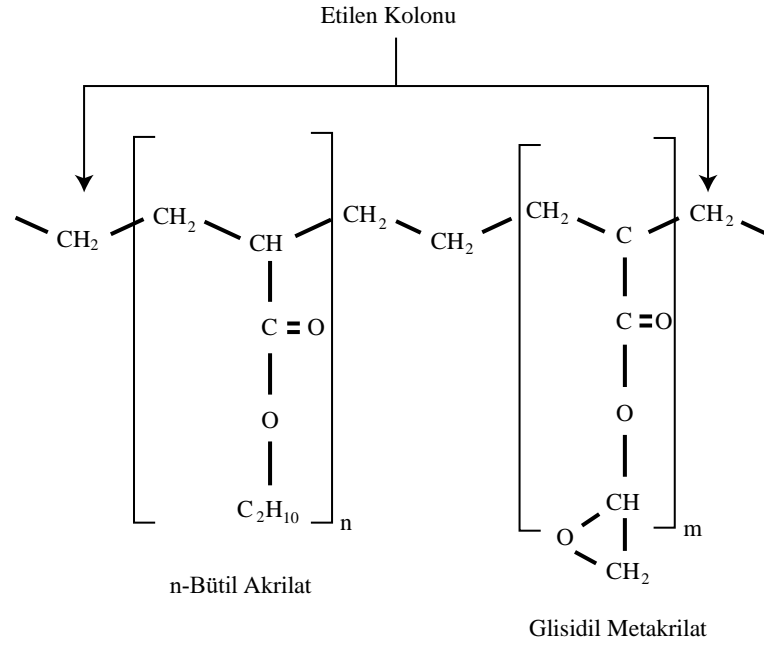
Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Fonksiyonelleştirme (İşlevselleştirme)	Uyumluluk artışı	Yüksek maliyet
Reaktif Polimerler	Uyumluluk artışı Yüksek sıcaklık performansında artış	Düşük sıcaklık performansında etkin değil Jelleşme problemi
Doyurma (Saturasyon)	Isı, oksidasyona ultraviyoleye karşı yüksek direnç	Faz ayrışımı problemi Yüksek maliyet
Sülfür	Depolama stabilitesinde artış	Sadece doymamış polimerler için uygun
Vulkanizasyonu	Yüksek sıcaklık performansında artış	Oksidatif yaşlanmaya hassas Geri dönüşümü zor Hidrojen sülfid salınımı İnsan ve çevre sağlığına zararlı
Antioksidanlar	Oksidasyona karşı yüksek direnç	Yüksek maliyet
Nano malzemeler	Yüksek sıcaklık performansında artış Bazıları için düşük sıcaklık performansında artış Nem hasarına karşı dirençte artış Mikro çatlaklarda düşüş Adezyonda artış Yaşlanma direncinde artış Uyumluluk artışı Yorulmaya karşı dirençte artış	Yüksek maliyet Bazıları için düşük sıcaklık performansında artış Topaklaşma kolayca meydana gelebilir
Kil mineralleri	Depolama stabilitesinde artış Yaşlanma direncinde artış Yüksek sıcaklık performansında artış Yorulmaya karşı dirençte artış Nem hasarına karşı dirençte artış	Düşük sıcaklık performansında etkin değil İdeal pul haline getirmek zor
Bio-oil ve bio-polimer	Çevre dostu Düşük sıcaklık performansında artış Yorulma direncinde artış Isıl çatlamaya karşı dirençte artış İşlenebilirlikte artış Yaşlanma direncinde artış Faz ayrışımında azalış Düşük maliyet	Yüksek sıcaklık performansında azalış

2.4.3. Reaktif Etilen Terpolimer ve Polifosforik Asit

Reaktif Etilen Terpolimerler (RET'ler) yukarıda bahsedilen ve PMB'lerin dezavantajlarını gidermede kullanılan yöntemler olan reaktif polimerlerin bir çıktısıdır. Bazı çalışmalarda (Bulatovic vd, 2014; Gama vd, 2018; Jasso vd, 2015) polimer modifiye malzemelerinin elastomerler ve plastomerlerden sonraki üçüncü grubu olarak sınıflandırmaya ilave ediklerini görmek mümkündür.

Reaktif polimerlerin reaktifliği, bitüm molekülleri ile bağ kurabildiği varsayılan fonksiyonel grupları içerisinde bulundurmasından kaynaklanır. Maleik anhidrit ve

epoksi halkaları içeren etilen bazlı kopolimerlerle işlevselleştirilmiş termoplastik elastomerler bu grubun örnekleri arasındadır. Bunlardan ikincisi, etilenin, glisidil metakrilatın (GMA) ve bir ester grubunun (genellikle metil, etil veya bütül akrilat) rastgele kopolimerleridir ve ticari olarak temin edilebilmektedir (Polacco vd, 2004b). Reaktiflikleri sayesinde RET'ler, polietilen ve poliamid-6 veya poliolefinler ve polyesterler gibi farklı polimerik karışımların uyumlaştırıcıları olarak oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı reaksiyonların, bitüm modifikasyonu için yararlı olacağı ve RET'lerin hem bitüm modifikasyonunda uyumlaştırıcı hem de modifiye malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Polacco vd, 2004b). Şekil 2.29'da RET'in kimyasal yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Reaktif etilen terpolimerin kimyasal yapısı (de Sá Araujo vd, 2013)

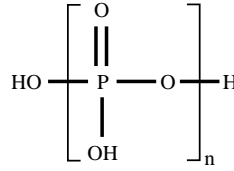
Bitüm ile RET karıştırıldıktan sonra, epoksi halkalarının tepkimeye girmesi için depolama sıcaklığında bir kür işlemi önerilir. Üreticilere göre, GMA'nın fonksiyonel kısmı asfaltenlerde bulunan karboksilik gruplarla reaksiyona girerek bir ester bağı oluşturur. Bu bağı sayesinde polimer modifiyeli bitümde meydana gelebilecek faz ayrışımı önlenir. Ayrıca, asfalten miseli, birden fazla karboksilik grup içeriyorsa, teorik olarak bir kimyasal bağı oluşturabilir (Polacco vd, 2004b).

GMA grubu ile bitümlerde bulunan fonksiyonel gruplar arasında başka reaksiyonların gerçekleşmesi de mümkündür. Örneğin, epoksi halkası, bir eter bağı oluşturmak için bir hidroksil grubu veya bir amin grubu tarafından açılabilir. Ayrıca,

yukarıda belirtilen reaksiyonlardan herhangi biri veya bir su molekülü tarafından bir GMA halkası açıldığında ve polimer ana zinciri üzerinde bir hidroksil grubu oluşturulduğunda, moleküller arası bir çapraz bağlama reaksiyonu meydana gelebilir. Bu, bitüm moleküllerini içermesi gerekmeyen bir polimer ağının oluşmasına yol açacaktır (Polacco vd, 2004b).

Nitekim bir bitüm RET ile modifiye edilecekse polimer miktarı çok dikkatli bir şekilde seçilmelidir, çünkü aşırı miktarda polimer ilavesi, çözünmez ve erimez bir bitüm jeli oluşumuna yol açacaktır. Bu olaya jelleşme adı verilir. Jelleşme riskinden kaçınmak için, RET polimerleri bitüme ağırlıkça %1.5 ve 2.5 arasında katılmaktadır (Domingos ve Faxina, 2015b; Polacco vd, 2004b). Bazı araştırmacılara göre, daha az reaktif gruplar içeren bir polimer ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Buna ilaveten, daha yüksek bir polimer miktarının kullanılması ekonomik bir dezavantaj oluşturur. Çalışmalarda RET'lerin tek başına modifiye katkı malzemesi olarak kullanılmasının ideal olmadığı belirtilmiştir, çünkü jelleşme riski nedeniyle asfalt kaplamanın performansı üzerinde zayıf bir etkiye sahip olabilirler (de Sá Araujo vd, 2013). Bununla birlikte, RET ve bitüm arasındaki tepkimenin hızı oldukça düşüktür ve bu durum en önemli problemlerden birini teşkil etmektedir. Bu nedenle, tepkime hızını arttırmak amacıyla katalizör olarak, RET ve bitüm arasındaki tepkimeyi hızlandıran polifosforik asidin (PPA) kullanılması önerilmiştir (Singh vd, 2019a). Ayrıca, RET ile birlikte PPA kullanılmasının bir diğer sebebi de jelleşme riskinden kaçınmak amacıyla daha düşük bir RET miktarının kullanılmasına olanak sağlamasıdır (Gama vd, 2018; Singh vd, 2019a).

PPA, serbest su içermeyen orta güçlü bir asittir ve tipik olarak diğer asitlerin bir karışımıdır, örneğin; pirofosforik asit, trifosforik asit ve yüksek asitler. PPA'nın kimyasal yapısı ile ilgili temsili bir resim Şekil 2.30'da verilmiştir. PPA, oksidan olmayan bir bileşiktir ve organik bileşiklerde yüksek oranda çözünür (Domingos ve Faxina, 2015b). PPA karışımında tek başına veya başka bir katkı maddesi ile birlikte kullanılabilir. PPA, modifikasyonda kullanıldığında bitüm üzerinde şu etkilere sahiptir: Katalizör olarak kullanıldığında sertliği değiştirmeden yumuşama noktasını artırır; direkt bir katkı malzemesi olarak kullanıldığında (asfaltın ve asidin reaksiyonu sayesinde) yüksek sıcaklığa dayanıklılığı artırır ve bir hızlandırıcı olarak kullanıldığında modifiye edilmiş karışımda ihtiyaç duyulan polimer miktarını azaltır (Gama vd, 2016).

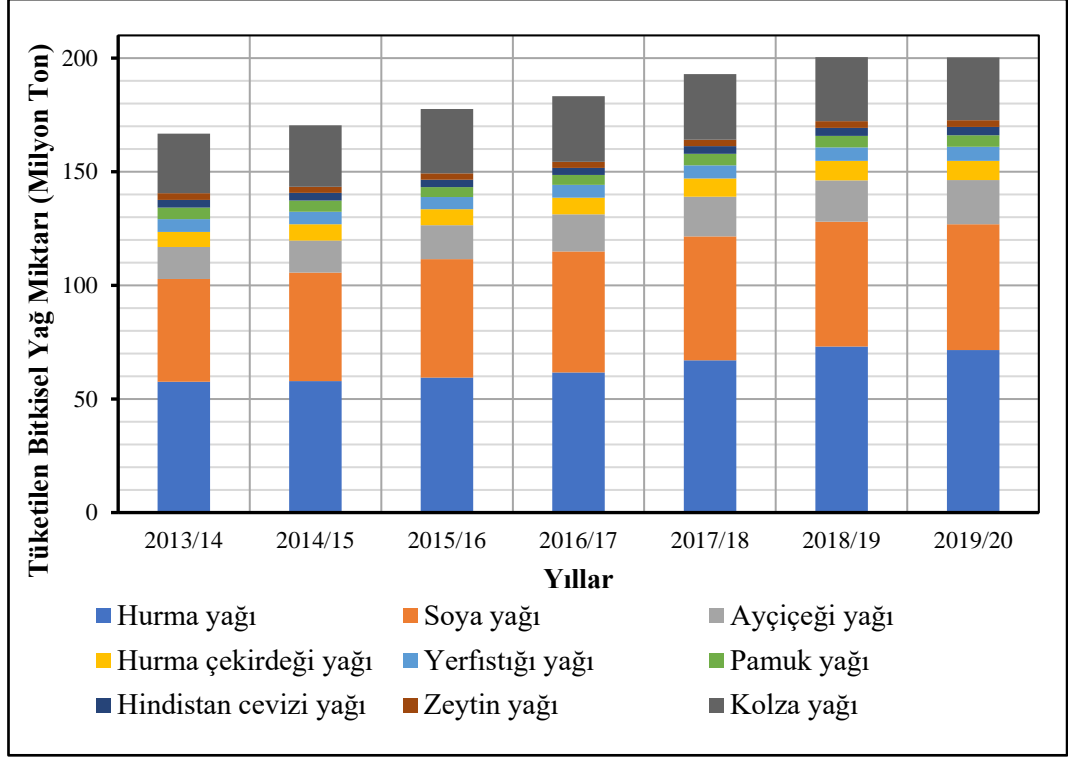


Şekil 2.30. PPA'nın kimyasal yapısı (de Sá Araujo vd, 2013)

2.4.4. Bitkisel Atık Yağ

Dünya nüfusundaki artışla birlikte yiyecek tüketiminin artması evsel atık miktarının da artması ile sonuçlanmıştır. Bu evsel atıklardan en yaygın olanı yemeklik yağlardır. Bu yağlar, bitkisel ve hayvansal olmak üzere iki farklı kökene sahip olabilirler. Bununla birlikte literatürde atık yağların isimlendirilmesi ile ilgili farklı kullanımlar da mevcuttur. Atık yemeklik yağ, atık kızartma yağı, bitkisel atık yağ (*Waste cooking oil, waste edible oil, waste vegetable oil, waste vegetable cooking oil, waste edible vegetable oil, used cooking oil, used frying oil*) ve benzeri farklı isimlerde kullanıldığını görmek mümkündür.

Bitkisel yağlar elde edildiği bitkiye göre farklı özelliklere sahiptirler ve yemek endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Zahoor vd, 2021). Şekil 2.31'de görüldüğü üzere dünya genelinde toplam bitkisel yağ kullanımı 2020 yılında 200,27 milyon ton olmuştur ve bu değer zamanla artacağı öngörülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere zamanla meydana gelen bitkisel atık yağ miktarında da bir artış söz konusudur. Bu atık yağların ise sadece %20-30'u geri dönüştürülmekte veya yeniden kullanılmaktadır (Chen vd, 2014b). Geri dönüştürülmeyen atık yağların yok edilmesi oldukça dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. Atık yağların; mutfak lavabolarına, çöp kutularına, kanalizasyon ağına, toprağa, akarsulara veya denizlere dökülmesi insan ve çevre sağlığı ile ilgili ciddi problemlere yol açabilmektedir. Bu tür eylemler, kanalizasyon sistemlerinin tıkanması veya aşırı akması, su artıma maliyetlerinin artması, oksijen tedarikinin azalması gibi sebeplerle suda yaşayan canlılar için hayati tehlikelere yol açmaktadır. Böylece, tüm ekosistemi kötü bir şekilde etkileyen sonuçlar meydana gelebilmektedir (Zahoor vd, 2021).

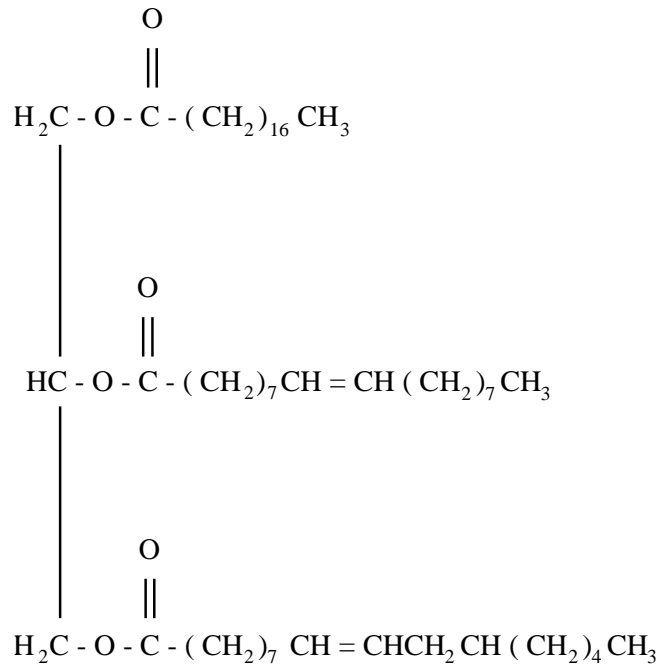


Şekil 2.31. Yıllar bazında dünya geneli türlerine göre bitkisel yağ tüketimi (Statista, 2021).

İnsan ve çevreye verebileceği zararlar göz önüne alınarak bitkisel atık yağların geri dönüşümü ile ilgili çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Kimyasal yapısından dolayı biyodizel üretiminde yenilenebilir hammadde olarak kullanımı oldukça yaygındır. Bununla birlikte sabun ve hayvan yemi gibi çeşitli biyo-bazlı ürünlerde de hammadde olarak kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı ise güncel bir konudur ve ilk patent henüz 2010 yılında alınmıştır (Bailey ve Phillips, 2010). Bitüm modifikasyonunda bitkisel atık yağların kullanımını iki farklı şekilde incelemek mümkündür. İlk olarak geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalardaki bitümlerin gençleştiricisi (*rejuvenator*) olarak kullanılmışlardır ve bu uygulama halen incelenmeye devam etmektedir. Diğer bir kullanım şekli ise sert bitümü yumuşatmak amacıyla bitkisel atık yağın bitüme katkı maddesi olarak ilave edilmesidir.

Yemek yapımında kullanılan bitkisel yağlar tekrarlı kızartma işlemine maruz kaldığı için belirli bir süre geçtikten sonra kullanılmaz hale gelirler ve bitkisel atık yağları meydana getirirler. Bitkisel yağlar, gliserol ve yağ asidi esterlerinden oluşan doymuş hidrokarbonlardan (trigliseridlerden, Şekil 2.32) meydana gelirler. Ancak, tekrarlı kızartma işleminden kaynaklı hidroliz, oksidasyon, polimerizasyon ve bitkisel atık yağ ile pişirilen yemek arasındaki malzeme transferi gibi kimyasal reaksiyonlar sebebiyle bitkisel atık yağ ile taze bitkisel yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri

arasında farklılık mevcuttur. Bitkisel atık yağların özellikleri sıcaklık ve kızartma süresi gibi kızartma koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kızartma işlemi, trigliseridlerin parçalanarak digliseridlere, monogliseridlere ve serbest yağ asitlerine (*free fatty acids, FFAs*) dönüşmesine yol açar. Sıcaklık ve kızartma süresinin artması trigliseridlerin hidrolizini artırır ve bu durum, bitkisel atık yağ içerisindeki serbest yağ asidi miktarının artması ile sonuçlanır (Raqeeb ve Bhargavi, 2015). Bitkisel atık yağın serbest yağ asidi miktarı arttıkça kalitesinin ve bitüm ile karıştırıldığında gösterdiği etkinin azaldığı belirtilmektedir (Zahoor vd, 2021).



Şekil 2.32. Tipik bir trigliserid molekülünün yapısı (Srivastava ve Prasad, 2000)

Bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesi bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Genellikle, bitkisel atık yağ ilavesiyle bitümün; yumuşaklığı, penetrasyonu ve yaşlanmaya karşı direnci artarken viskozitesi, yumuşama noktası ve tekerlek izi direnci azalır. Burada belirtilen genel özelliklerle ilgili yapılan bilimsel çalışmalar “Kaynak Özetleri” bölümünde ayrı ayrı incelenecek ve özetlenecektir.

2.5. Kaynak Özetleri

Bu çalışmanın fikri açıdan oluşmasını sağlayan, çalışmanın gelişmesinde ve yürütülmesinde etkili rol oynayan literatürdeki diğer çalışmalar bu bölümde özetlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar RET ve bitkisel atık yağlar için ayrı ayrı

incelenmiştir. Bu sebeple, bu bölümdeki kaynaklar iki farklı başlık altında özetlenmiştir.

2.5.1. Reaktif Etilen Terpolimerler ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümde literatür incelemesi sonucunda erişilebilen ve RET'lerin kullanımını içeren yayınlar kronolojik bir sıra içerisinde özetlenmiştir. Çalışmaların bir kısmı RET ile birlikte PPA kullanımını barındırırken bir kısmında sadece RET kullanılmıştır.

Bhurke vd (1997) yaptıkları çalışmada, SBS, SEBS, SBR ve Elvaloy AM ile modifiye edilmiş bitümlerin çatlama dayanımını ve morfolojisini incelemişlerdir. BSK'ların çatlama özelliklerine polimer modifikasyonunun etkisini belirlemek için sayısal bir yöntem olan J -sınır integral çatlama dayanımı ölçümlerinden faydalanmışlardır. Kritik J -integral çatlama dayanımını (J_{1C}) belirlemek için bir deney yöntemi geliştirmişlerdir ve düşük sıcaklıkta (-10°C) bitümün ağırlığına %0, %3 ve %5 oranlarında SEBS ve %0, %1 ve %2 oranlarında Elvaloy AM ile modifiye edilmiş bitümlerde farklı boyutlarda çentikler açarak J_{1C} değerlerini hesaplamışlardır. Ayrıca, BSK kırılma ve çatlama davranışını, kapsamlı bir şekilde doğal ortam çevresel elektron mikroskopu (ESEM) çekme deneyi ve düşük sıcaklıkta çatlama dayanımı ölçümleri yaparak belirlemişlerdir. Mikroskop görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre çatlaklarda en yoğun lif oluşumu SBR modifiyeli bitümlerde gerçekleşmiştir. SBR ile modifiye edilmiş bitümlerin asfalt betonundaki çatlak oluşumunu önlemede faydalı olacağını ifade etmişlerdir. %3 SEBS ile modifiye edilen bitümler için kritik J_{1C} değeri en yüksek değer olurken Elvaloy AM saf bitümün çatlama davranışı üzerinde önemli bir etkide bulunmamıştır.

Michon vd (1998) yaptıkları çalışmada, saf polimerlerin ve polimer modifiyeli bitümlerin morfolojik yapılarını ESEM yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Polimer olarak SB, SBR ve Elvaloy AM kullanmışlardır. Numunelerin ESEM ile kolaylıkla gözlemlenebilen morfolojik farklılıklar gösterdiğini belirlemişlerdir. PMB'lerin birçok yönden birbirilerinden farklı olduğunu ancak sıcaklığın artması ile bunların makro dokularını kaybettiklerini ifade etmişlerdir.

Hesp vd (2002), RET modifiyeli bitümlerin düşük sıcaklıklarda kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı petrol rafinerinden temin edilen saf bitümlere, karışım ağırlığına %5 oranında RET ilave etmişlerdir. Bazı numunelere %0.2

oranında fosforik asit ilavesi de yapılmıştır. Hazırladıkları numunelere mikroskopi, düşük sıcaklık kırılması ve basınç akma gerilmesi deneylerini uygulamışlardır. RET modifiyeli bitümlerin morfolojilerinin kullanılan saf bitümün kaynağına göre değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, fosforik asit ilavesinin RET ile bitüm arasındaki uyumluluğu arttırarak düşük sıcaklık kırılma performansını artırdığını ifade etmişlerdir.

Selvavathi vd (2002), bitümün modifiye edilmesinde elastomer ve RET kullanımını kıyaslamışlardır. 60/70 ve 80/100 penetrasyon sınıflarındaki bitümlere, %8, %10, %12 oranlarında lastik kırıntısı (CR) ve %1.5, %2.0, %2.5 RET ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, viskozite, dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), parlama noktası ve Marshall stabilite deneyleri uygulamışlardır. Saf bitüme kıyasla modifiyeli bitümlerin yumuşama noktalarında önemli bir artışın meydana geldiğini ve penetrasyon değerinin azaldığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, RET modifiyeli bitümlerin düktilite ve Marshall stabilite değerlerinin CR modifiyeli bitümlerden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Polacco vd (2004a), yaptıkları çalışmada RET modifiyeli bitümlerin reolojisini incelemişlerdir. İki farklı kökenden elde edilmiş 70/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %1.5, %2, %2.5 oranlarında Elvaloy AM ve %1.5, %1.75, %2, %2.5 oranlarında Elvaloy 4170 RET ilave etmişlerdir. Bu numunelerin dielektrik ve reolojik özelliklerini kür sıcaklığında belirli bir süre bekletmeden önce ve beklettikten sonra incelemişlerdir. Numunelere DSR, yumuşama noktası ve floresan mikroskopisi deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre saf bitümün kompleks modülünde ve viskozitesinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca toplanan tüm veriler polimer-bitüm sistemlerinin jelleşme eğiliminde olduğunu göstermiştir.

Polacco vd (2004b), polimer modifiyeli bitümlerde oluşan geçici ağları incelemişlerdir. Üç farklı kökenden elde edilmiş 70/100 ve 200/300 penetrasyon sınıfındaki bitüme ağırlığınca, %4, %5.5, %7.2 oranlarında SBS, %4, %6, %8 oranlarında EVA ve %1.75 RET ilave etmişlerdir. RET modifiyeli bitümleri 0, 24, 48 ve 72 saatlik farklı kür koşullarına maruz bırakmışlardır. Hazırlanan numunelerin viskozite fonksiyonlarını DSR cihazında farklı sıcaklıklarda durgun-hal hız tarama testleri ile belirlemişlerdir. SBS ve EVA'nın bitüm ile fiziksel bir etkileşimde, RET'in ise kimyasal bir etkileşimde olduğunu ifade etmişlerdir. SBS veya EVA kullanıldığında, belirli sıcaklıklardaki, viskozite eğrileri, düşük kesme hızlarında

Newtoniyen davranışı sergilemiş, ardından iki farklı kesme-incelme olayı meydana gelmiştir. Bazı durumlarda ise, ilk kesme-incelme olayından önce küçük bir kesme-kalınlaşma bölgesi oluşmuştur. Benzer olaylar, RET ile modifiye edilmiş bitümlerin viskozite eğrilerinde görülmemiştir ve araştırmacılar bu durumun bitüm ile fiziksel polimer ağının geçici doğası ile ilgili olabileceğini ifade etmişlerdir.

Keyf vd. (2007) Türkiye'deki otoyollarda yaygın olarak kullanılan 60/70 penetrasyon sınıfındaki bitümün özelliklerini geliştirmek için bitümü RET ve etilen terpolimer (ETP) ile modifiye etmişlerdir. Saf bitüme, karışım ağırlığına %2.4 ETP ve %0.4, %0.6, %0.8, %1 ve %1.2 RET ilave etmişlerdir. Ayrıca, katalizör olarak karışıma ağırlığına %0.2 oranında süper fosforik asit (SPA) ilave etmişlerdir. Modifiye edilmiş bitümlere Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), optik mikroskopi, penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri uygulamışlardır. Ayrıca, numuneleri farklı karıştırma sürelerine göre değerlendirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre modifiyeli bitümlerin yumuşama noktalarının arttığını, penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, RET'in asfaltın içerisindeki karboksilik asit grupları ile tepkimeye girip esterler oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Kodrat vd (2007), PPA katkısının bitüm üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar aynı sınıftaki saf ve polimer modifiyeli (SB, SBS, Elvaloy 4170) malzemelerle kıyaslamışlardır. PPA modifikasyonunun etkisi geleneksel yöntemlerle ve Ontario, Kanada'da geliştirilen üç yeni bağlayıcı deneyi ile incelemişlerdir. Basınç gerilmesi deneyi ve büyütülmüş eğme kırıntı deneyini, düşük sıcaklık performans özelliklerini incelemek için kullanmışlardır. Düktil kopmalara karşı direnci belirlemek için çift kenarlı gerilme deneyinden faydalanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, gevrek hal kırılma özelliklerinin ve tersinir yaşlanma süreçlerinin PPA modifikasyonundan büyük oranda etkilendiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, bazı numunelerde düşük sıcaklık sınıfında önemli düşüşlerin meydana geldiğini belirlemişlerdir. Laboratuvar deneylerinin dışında deney amaçlı kaplamalar inşa ederek üç yıl sonrasında incelemeler yapmışlardır. Saha gözlemlerinden elde edilen sonuçlara göre, PPA kullanımının, polimerin formülasyonuna bağlı olarak, tekerlek izi oluşumunu önleyebileceği veya katkıda bulunabileceğini ifade etmişlerdir.

Pérez-Lepe vd (2007), farklı PMB'lerin yüksek sıcaklık stabilitesini reolojik açıdan değerlendirmişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki bitümü ağırlığına %5

SBS, %5 yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), %5 düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), %5 etilen-probilen-dien terpolimer (EPDM) ve %2 Elvaloy RE ile modifiye etmişlerdir. Farklı depolama sürelerinde depolama tüpünün yüzeyinden numuneler alarak lineer viskoelastik ve viskoz özelliklerini değerlendirmişlerdir. Bu gözlemleri yapmak için reometre cihazından faydalanarak salınımlı kesme frekans tarama deneyi ve viskoz akma ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre, bitüme katkı maddesi olarak RET'lerin kullanılmasının daha stabil bağlayıcılar elde etmek için umut vadeden bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir.

Yidirim (2007), 2007 yılında PMB'ler hakkında bir derleme yazmıştır. Bu çalışmada CR, SBS, SBR ve Elvaloy RET ile ilgili o döneme kadar literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarını ve kullanılan deneysel yöntemleri incelemiştir. RET'in bitüm ile kimyasal bir bağ kurarak ayrışma probleminin önüne geçtiğini ve kaplamanın nem hasarına karşı direncini arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca, DSR sonuçlarına göre RET kullanımının bitümün yüksek sıcaklık performansını artırdığına ifade etmiştir.

Hafeez ve Kamal (2009), yaptıkları çalışmada üç farklı bitümün farklı sıcaklıklardaki ve yaşlanma etkisi altındaki reolojik özelliklerini incelemiştir. 50/60 ve 60/70 penetrasyon sınıflarında iki saf bitüm kullanmışlardır. Buna ilave olarak üçüncü bitümü ise 60/70 penetrasyon sınıfındaki bitüme ağırlığınca %1.6 Elvaloy 4170 ilave ederek hazırlamışlardır. Numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, DSR ve RTFO deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre deney sıcaklığı arttıkça numunelerin kompleks modüllerinin önemli derece azaldığını, ancak faz açılarının arttığını belirtmişlerdir. Kısa dönemli yaşlanmanın sıcaklığa kıyasla bitümün reolojisi üzerinde nispeten daha az etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Keyf (2010), yaptığı çalışmada saf bitüme polimer ilavesinin penetrasyon indeksi üzerindeki etkisini incelemiştir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme hem %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3 oranlarından birinde SBS hem de %2 Elvaloy RET ilave ederek numuneler hazırlamıştır. Bunlara penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulayarak penetrasyon indekslerini belirlemiştir. Sonuç olarak polimer ilavesinin saf bitümün penetrasyon indeksini önemli derece arttırarak bitümün sıcaklık hassasiyetini azalttığını belirlemiştir.

Topal (2010), plastomerik polimerlerle modifiye edilmiş bitümlerin özelliklerini ve mikroyapılarını incelemiştir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %3, %4, %5, %6, %7 oranlarında Evatane 2805, %2, %3, %4, %5, %6 oranlarında Elvaloy 3427 ve %0.5, %1, %1.5, %1.75 oranlarında Elvaloy 4170 ilave ederek modifiyeli bitümler hazırlamıştır. Numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, depolama stabilitesi ve dönel viskozite (RV) deneyleri uygulamıştır. Bunlara ilaveten, katkı maddelerinin bitüm içerisindeki dağılımını (mikro dokusunu) floresan mikroskobu ile inceledikten sonra fotoğraf analizi yaparak sayısallaştırmıştır. Çalışmasının sonucunda Evatane 2805 ve Elvaloy 3427 katkı malzemelerinin bitüm içerisinde dağıldıklarını, Elvaloy 4170 katkı malzemesinin ise bitüm ile tepkimeye girerek florsan mikroskobunda gözlemlenemediğini ifade etmiştir. Ayrıca geleneksel deneyler sonucunda plastomerik katkı malzemelerinin saf bitümü sertleştirdiğini, diğer malzemelere kıyasla Elvaloy 4170'in yaşlanma olayından daha az etkilendiğini belirtmiştir.

Li vd (2011), PPA içeren modifiyeli bitümlerin ve sıcak karışımların özelliklerini laboratuvar ortamında değerlendirmişlerdir. 52-34 performans sınıfındaki (PG 52-34) saf bitüme ağırlığınca %0.75 PPA, %2.0 SBS, %1.0 SBS + %0.3 PPA ve %1.0 Elvaloy + %0.3 PPA ilave ederek farklı kombinasyonlarda numuneler hazırlamışlardır. Hazırladıkları bitüm numunelerinin performans sınıflarını belirlemiş ve çoklu gerilme sünme geri kazanım (MSCR) deneyi uygulamışlardır. Buna ilave olarak, hazırladıkları sıcak karışımlarla dinamik modül ve yorulma dayanımı deneylerini yürütmüşlerdir. MSCR deney sonuçlarına göre en iyi performansı SBS+PPA ve Elvaloy+PPA modifiyeli bitümlerin sergilediğini belirtmişlerdir. Dinamik modül deneyinde Elvaloy+PPA kullanılarak hazırlanan karışım yüksek sıcaklıklarda daha rijit düşük sıcaklıklarda daha esnek davranarak en arzu edilir sonuçları vermiştir. Yorulma dayanımlarını kıyasladıklarında ise verilere normalleştirme uygulandıktan sonra en uzun yorulma ömrünün Elvaloy+PPA modifiyeli bitümle hazırlanan karışımda olduğunu ifade etmişlerdir.

Bulatovic vd (2013), polimer modifiyeli bitümlerin kaplamadaki kalıcı deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 70/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %2 SBS, %2 EVA ve %1.9 Elvaloy AM ilave ederek üç farklı polimer modifiyeli bitüm hazırlamışlardır. Bunlara; penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri kazanım, Frass kırılma noktası, depolama stabilitesi, DSR ve RTFO

deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, polimer modifikasyonunun saf bitüme kıyasla deformasyona karşı direnci ve yüksek sıcaklık performans sınıfını arttırdığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, SBS ile bitüm arasında fiziksel, Elvaloy AM ile bitüm arasında ise kimyasal bir etkileşimin meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, tüm polimer modifiyeli bitümlerin depolama stabiliteilerinin iyi olduğunu göstermişlerdir.

de Sá Araujo vd (2013), yaptıkları çalışmada geleneksel bitümün ve SBS, sönmüş kireç, RET ve PPA ile modifiye edilmiş bitümlerin kötü hava koşulları nedeniyle yaşlanmasını incelemişlerdir. Numunelerin bozunması FT-IR ve termal analiz kullanılarak analiz edilmiştir. SBS, PPA ve sönmüş kireç ile modifiye edilmiş bitümler, kızılötesi spektroskopi sonuçları göz önüne alındığında, 200 saate kadar yaşlanma durumu için saf bitümden daha yüksek bir foto bozulma direnci göstermiştir. SBS modifiyeli bitümler ve sönmüş kireç modifiyeli bitümler için yaşlanmadan sonraki maksimum bozunma sıcaklığı artmıştır.

Bulatovic vd (2014), farklı GMA miktarına sahip RET'lerin reolojik özelliklerini incelemişlerdir. 50/70 ve 70/100 penetrasyon sınıflarındaki saf bitümlere %1.6 ve %1.9 oranlarında Elvaloy 4170 ve Elvaloy AM ilave ederek farklı PMB'ler üretmişlerdir. Bu çalışma kapsamında polimerlerle modifiye edilmiş bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri kazanım, depolama stabilitesi, DSR ve RTFO deneyleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda tüm PMB'lerin saf bitüme kıyasla geleneksel özelliklerinin geliştiği ifade edilmiştir. Polimer ilavesi saf bitümün yüksek sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltırken tekerlek izi direncini, depolama stabilitesini ve yaşlanmaya karşı direncini arttırmıştır. En iyi reolojik davranışın, yüksek asfalten oranına sahip bitümün (50/70 penetrasyon sınıflı) yüksek reaktif gruba (GMA) sahip reaktif polimer ile modifiye edilmesi ile elde edildiğini ancak ilave edilecek polimer miktarı belirlenirken kimyasal jel formasyonunun oluşmayacağı oranın seçilmesinin gerekli olduğunu ifade etmişlerdir.

Vachhani ve Mishra (2014), yaptıkları çalışmada viskozite sınıfı 30 (VG30) olan 50/70 penetrasyonlu bitümün ve bu bitümün polimer modifiyeli halinin fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Saf bitüme ağırlığınca %1.5, %1.8 ve %2 oranlarında Elvaloy 4170 ilave ederek PMB numunelerini hazırlamışlardır. Bu numunelerin; fiziksel özellikleri belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri kazanım ve dönel viskozite deneylerinden yararlanırken yaşlanma olayını simüle

etmek için RTFO deneyini kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre Elvaloy katkısı saf bitümün penetrasyonunu azaltırken, yumuşama noktasını, elastik geri kazanımını ve viskozitesini arttırmıştır. Ayrıca, yaşlanmada kütle kaybını azaltmıştır. Bu sonuçlara göre çalışmacılar, bu katkı malzemesinin ağır trafikli ve yüksek sıcaklıklı bölgelerde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Bagdat vd (2015), yaptıkları çalışmada oksitlenmiş bitümün polimer ilavesiyle reolojik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki oksitlenmiş saf bitüme ağırlığınca %1.4 Elvaloy 4170 ilave ederek PMB numunesini hazırlamışlardır. Numunelere DSR ve BBR deneyi uygulayarak reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre, Elvaloy 4170 ilavesiyle saf bitümün hem yüksek sıcaklıklardaki hem de düşük sıcaklıklardaki performansında iyileşme meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Domingos ve Faxina (2015a), benzer yüksek sıcaklık performans sınıfındaki PMB'lerin kısa dönemli yaşlanmasıyla reolojilerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme ağırlığınca %1.2 PPA, %1.30 Elvaloy + %0.3 PPA, %6 PE ve %4.5 SBS ilave ederek farklı polimerlerle modifiye edilmiş PMB numuneleri hazırlamışlardır. Numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite, DSR ve RTFO deneyleri uygulamışlardır. Yaşlanma etkisi ile bitümlerin sertleştiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bitümler üzerinde yaşlanma etkisini incelerken fiziksel özelliklerden ziyade reolojik özelliklerin dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Domingos ve Faxina (2015b) MSCR deneyi ile Elvaloy modifiyeli bitümlerin reolojik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yüksek sıcaklık performans sınıfı 64°C olan saf bitüme ağırlığınca sadece %1.2 PPA ve %1.3 Elvaloy + %0.3 PPA ilave ederek iki farklı modifiyeli bitüm hazırlamışlardır. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite, MSCR ve RTFO deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, Elvaloy + PPA modifiyeli bitümün hem en yüksek performans sınıfını hem de ani gerilme değişimlerine karşı en az hassasiyeti göstererek en olumlu sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sadece PPA modifikasyonundan elde edilen sonuçlar her ne kadar diğer kombinasyon kadar iyi olmasa da PPA'nın bir alternatif katkı maddesi olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Jasso vd (2015), yaptıkları çalışmada iki farklı gruptaki polimerlerin bitümün mekanik ve reolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme ağırlığınca %0.2 PPA, %0.6 Elvaloy, %0.2 PPA + %0.6 Elvaloy, %3-4 SBS ve %3 SBS + sülfür ilave ederek farklı polimerlerle modifiye edilmiş PMB numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan karışımların doğrusal viskoelastik özelliklerini küçük genlikli salınım kesmeleri ve durgun hal viskozitesi yöntemlerini kullanarak DSR cihazında incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, Elvaloy ve PPA'nın bitümü sertleştirdiği görülmüştür. Elvaloy, PPA ve bitüm arasında fiziko-kimyasal etkileşimlerin olabileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, SBS'nin bitümle üç boyutlu ağlar kurarak bitümün reolojik özelliklerini geliştirdiğini belirtmişlerdir. Sülfat ilavesinin ise bu ağları kuvvetlendirdiğini açıklamışlardır. En üstün reolojik özellikler SBS ile modifiye edilen bitümlerde gözlemlenirken Elvaloy ve PPA ile modifiye edilecek bitümlerin sıcak iklimin hâkim olduğu bölgelerde önemli bir rol oynayacağını ifade etmişlerdir.

Keyf (2015), bitümü SBS, EVA ve Elvaloy RET kullanarak modifiye etmiştir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme ağırlığınca %1 RET, %1 SBS ve %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5 oranlarında EVA ilave ederek PMB numuneleri hazırlamıştır. Bunlara; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve elastik geri kazanım deneyleri uygulamıştır. Ayrıca, %2 RET, %1 SBS ve %1 EVA içeren farklı bir numune hazırlayıp bu numuneyi FT-IR ve termogravimetrik analiz/diferansiyel termal analize tabi tutmuştur. Yaptığı deney sonuçlarına göre, modifikasyon ile saf bitümün penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığını penetrasyon indeksi, yumuşama noktası ve elastik geri kazanım değerlerinin arttığını belirtmiştir.

Javid (2016), yaptığı çalışmada polimer modifikasyonunun bitümün reolojisi üzerindeki etkisini incelemiştir. 60/70 ve 80/100 penetrasyon sınıflarındaki saf bitümlere ağırlığınca ayrı ayrı %1.35, %1.7 ve %2 oranlarında Elvaloy RET ilave ederek numuneler hazırlamıştır. Bunlara, DSR deneyi uygulayarak reolojik özelliklerini yorumlamıştır. Yaptığı deneylerin sonucunda polimer modifikasyonunun bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, viskozite-sıcaklık hassasiyetinin polimer ilavesi ile değiştiğini ve bu durumun, bitümü daha sıcak ve daha soğuk bölgelerdeki esnek kaplamalarda kullanıma uygun hale getirdiğini ifade etmiştir.

Domingos vd (2017), yaptıkları çalışmada bitümlerin ve asfalt karışımların tekerlek izine karşı dirençlerini değerlendirmişlerdir. Karışımların oluşturulmasında aynı PG (performans sınıfı) derecesindeki bağlayıcıları ve yoğun granülometrilili agregaları kullanmışlardır. Bitümlerin modifikasyonunda üç tip polimer (Elvaloy, SBS, SBR) ve polifosforik asit (PPA) kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere; bitümler için yumuşama noktası, DSR ve MSCR, asfalt karışımlar için akma sayısı deneyleri uygulamışlardır. Bitümlere ve asfalt karışımlara uygulanan deneylerin sonuçları arasında ilişki kurmaya çalışmışlardır ve sadece MSCR deneyinden elde edilen sonuçlar ile akma sayısı arasında bir benzerlik olduğunu bulmuşlardır.

Irfan vd (2017), yaptıkları çalışmada bitümü, hava alanlarında yakıt hasarına karşı dirençli kaplamalar oluşturulabilmesi için Elvaloy RET 4170 polimeri ile modifiye etmişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki bitümü modifiye etmek için ağırlığınca %1, %2, %3, %4 oranlarında Elvaloy RET 4170 ilave etmişlerdir. Çalışma kapsamında bitüm ve BSK numunelerine deneyler uygulamışlardır. Bu deneyler; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, DSR, BBR, RV, Hamburg tekerlek izi, dolaylı çekme, Marshall stabilite ve akma, esneklik modülü (M_R) deneylerinden oluşmaktadır. Bitümlere ve karışımlara uygulanan deneyler sonucunda optimum Elvaloy RET 4170 katkı oranının %1 olduğunu, bu orandaki polimer ilavesi ile bitümün sertleştiğini, yüksek sıcaklık performansının, tekerlek izine karşı dayanımın, esneklik modülünün ve yakıt hasarına karşı direncin arttığını ifade etmişlerdir.

Singh vd (2017), PPA ve Elvaloy modifiyeli bitümlere ılık asfalt katkı malzemesi (WMA) ilave ederek performanslarını incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1.6 Elvaloy ve %0.3 PPA ilave ederek kontrol numunesi hazırlamışlardır. Kontrol numunesine su, kimyasal ve vaks esaslı birbirinden farklı WMA ilave ederek deney numuneleri üretmişlerdir. Hazırladıkları numunelerin tekerlek izi direncini değerlendirmek amacıyla MSCR ve yorulma dayanımını değerlendirmek amacıyla doğrusal genlik taraması (LAS) deneyleri uygulamışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre kontrol bitümüne kimyasal ve su esaslı WMA ilavesiyle tekerlek izi dayanımında bir kaybın meydana geldiğini vaks esaslı WMA ilavesiyle ise bu dayanımın arttığını göstermişlerdir. Yorulma dayanımı açısından ise vaks esaslı WMA kontrol bitümünün yorulma dayanımını etkilemediğini diğer WMA'ların ise kontrol bitümünün yorulma ömrünü azalttığını ifade etmişlerdir.

Ali vd (2018), MSCR yöntemiyle PMB'nin tekerlek izi potansiyelini incelemişlerdir. Attock petrol rafinerisinden temin edilen 60/70 penetrasyonlu saf bitüme (ARL) %1.35, %1.7, %2 oranlarında Elvaloy RET, Karachi petrol rafinerisinden temin edilen 60/70 penetrasyonlu saf bitüme (KRL) %2.5, %3.5, %4.5 oranlarında Elvaloy AC ilave ederek PMB numuneleri hazırlamışlardır. Numunelerin tekerlek izi performansını değerlendirmek amacıyla DSR cihazında MSCR deneyi yürütmüşlerdir. Deney sonuçlarında saf KRL bitümünün ARL bitümünden daha iyi sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Elvaloy RET ve Elvaloy AC ilavesiyle iki saf bitümünde yüksek sıcaklık performansını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Gama vd (2018), yaptıkları çalışmada RET, PPA ve HDPE'nin ayrı ayrı veya kombinasyon halinde bitümün reolojik özelliklerine etkisini, PG 76-22 SBS'li bitüm ile kıyaslamışlardır. Hazırladıkları numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri kazanım ve MSCR deneyleri uygulamışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre, PPA ve HDPE'nin bitümün sadece sertliğini arttırdığı bulunurken RET'in ayrıca bitümün elastikliğini de arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, PPA ve HDPE'den ikisinin de RET'in etkinliğini arttırdığı ve böylece standart PG 76-22 SBS bitümünün özelliklerine eşdeğer veya muhtemelen daha iyi özellikler sergileyecek bitümün elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Geckil ve Seloglu (2018), yaptıkları çalışmada RET ile modifiye edilmiş bitümün performans özelliklerini incelemişlerdir. 100/150 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %0.5, %0.75, %1 oranlarında Elvaloy RET 4170 ilave ederek PMB numunelerini hazırlamışlardır. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, RV ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda RET modifikasyonunun bitümün sıcaklık hassasiyetini azalttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dirençte kayba neden olmadan tekerlek izi direncini ve yorulma ömrünü arttırdığını belirtmişlerdir.

Singh vd (2018), yaptıkları çalışmada polimer ve PPA modifiyeli bitümle birlikte soyulma önleyici katkı malzemelerinin kullanılabilirliğini serbest yüzey enerji yaklaşımıyla incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1.6 Elvaloy ve %0.3 PPA ilave ederek elde ettikleri kontrol numunesine su, kimyasal ve vaks esaslı birbirinden farklı WMA ilave ederek deney numuneleri üretmişlerdir. Bazalt ve granit agregalar için hazırladıkları numunelerin temas açılarını belirlemişlerdir. Böylece agrega ile bitüm arasındaki bağlantıyı değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın

sonucunda agrega ile bitüm arasındaki bağlantının kontrol bitümüne WMA ilavesiyle azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, bazalt agreganın granit agregaya kıyasla bitümle daha iyi bağlantı kurduğunu ifade etmişlerdir.

Geckil (2019), yaptığı çalışmada RET modifiyeli bitümün fiziksel, kimyasal, mikroyapısal ve reolojik özelliklerini incelemiştir. 160/220 penetrasyon sınıfındaki bitüme ağırlığınca %0.3 PPA ve %0.4, %0.8, %1.2 oranlarında Elvaloy RET 5160 ilave ederek numuneler hazırlamıştır. Bunlara; geleneksel deneyler, DSR, BBR, RTFO, PAV, X-ray kırılımı ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) deneyleri uygulamıştır. Geleneksel deney sonuçlarına göre PMB'nin saf bitüme kıyasla çok daha sert olduğunu ve yaşlanma olayından daha az etkilendiğini ifade etmiştir. Reolojik deneylerin sonuçlarına göre ise Elvaloy RET ilavesinin bitümün tekerlek izine karşı direncini ve yorulma dayanımını arttırdığını belirlemiştir. Ayrıca, saf bitümün yüksek sıcaklık sınıfının arttığını belirtmiştir. Bununla birlikte, bitümün sertleşmesine paralel olarak düşük sıcaklıklardaki çatlakların oluşumuna karşı direncinin azaldığını açıklamıştır.

Singh vd (2019a), RET ve PPA modifiyeli bitüme WMA ve/veya sönmüş kireç ilavesinin orta sıcaklıklardaki kırılma özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Daha önceki çalışmalarında olduğu gibi, saf bitüme %1.6 oranında RET ve %0.3 oranında PPA ilave ederek hazırladıkları kontrol numunelerine vaks, kimyasal ve zeolit esaslı WMA katkı malzemelerinden ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelerin ayrıca sönmüş kireçli olanlarını da üretmişlerdir. Orta sıcaklıklarda bitümün kırılma özelliklerini belirleyebilmek amacıyla numunelere iki kenar çentikli gerilme (DENT) deneyi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, kimyasal esaslı WMA'nın kontrol numunesinin kırılma özelliklerini önemli miktarda iyileştirdiğini, vaks esaslı WMA'nın negatif yönde etkilediğini, zeolit esaslı WMA'nın ise çok küçük miktarda iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Bununla birlikte, kullanılan kombinasyondan bağımsız olarak sönmüş kireç ilavesinin orta sıcaklıklardaki kırılma özelliklerine negatif etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Singh vd (2019b), RET ve PPA modifiyeli bitüme WMA ve/veya sönmüş kireç ilavesinin yüksek gerilme ve sıcaklıklardaki performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. %1.6 RET ve %0.3 PPA ilaveli kontrol numunesine farklı kökenli WMA'lar ve/veya sönmüş kireç ilave ederek deney numunelerini hazırlamışlardır. Yüksek sıcaklık performansını üç farklı kriter ile değerlendirmişlerdir; tekerlek izi

parametresi, zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibi ve MSCR deneyi. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, RET ve PPA modifiyeli kontrol numunesine Sasobit ilavesiyle tekerlek izi direncinin arttığını, Advera ve Evotherm ilavesiyle ise bu direncin azaldığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, Advera ilaveli numuneye sönmüş kireç katılmasının tekerlek izi direnci üzerindeki etkisinin negatif olduğunu, Evotherm ve Sasobit ilaveli numunelerde ise bu etkinin pozitif olduğunu ifade etmişlerdir.

Skronka vd (2019), BSK'lardaki tekerlek izi bozulmalarının farklı yöntemlerle belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada polimer modifikasyonundan ziyade deney yöntemi üzerinde durulmuştur. Bu sebeple, saf bitüme yüksek sıcaklık performansı 64°C olacak miktarda ayrı ayrı SBS ve Elvaloy 5160 + PPA ilave ederek PMB numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelere geleneksel deneyler ve modifiye edilmiş MSCR deneyi uygulamışlardır. Ayrıca, PMB'ler ile sıcak karışımlar hazırlayıp tekerlek izi deneyine tabi tutmuşlardır. Bitüme ve karışıma uygulanan deneyler arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda MSCR deneyinde daha yüksek gerilmelerin kullanılmasının BSK'lardaki tekerlek izi oluşma potansiyeli ile daha iyi bir korelasyona sahip olduğunu bulmuşlardır.

Xu vd (2019), yaptıkları çalışmada RET modifiyeli bitümün performansını poliüretan prepolimeri (PUP) ilave ederek geliştirmişlerdir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %0.2 PPA, %1, %1.25, %1.5, %1.75, %2 oranlarında RET ve %4, %6, %8, %10, %12, %14, %16 oranlarında PUP ilave ederek farklı kombinasyonlardaki kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Hazırladıkları bitüm numunelerine, penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, viskozite, BBR, MSCR ve FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Ayrıca, modifiyeli bitüm içeren sıcak karışım numuneleri üreterek Hamburg tekerlek izi, kiriş eğme ve Marshall stabilite deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları deney sonucunda, PUP, RET ve bitüm arasında kimyasal bir etkileşimin olduğunu, RET modifiyeli bitüme PUP ilavesiyle düşük sıcaklık performansının arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, kompozit modifikasyon için optimum RET oranının %1.5, PUP oranının ise %8-10 olduğunu belirtmişlerdir.

Athira vd (2020), yaptıkları çalışmada elastomerlerin ver RET'lerin bitümlerin kalıcı deformasyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Saf bitüme ağırlığınca %3,5 iki farklı SBS ve %3,5 iki farklı RET ilave ederek numuneler

hazırlamışlardır. Ayrıca, bu bitümler ile sıcak karışım numuneleri de hazırlamışlardır. Bitüm numuneleri üzerinde DSR ve MSCR deneyleri uygularken, karışım numunelerine akma sayısı, akma süresi ve tekerlek izi deneyleri uygulamışlardır. Bitümlere uyguladıkları deneylere göre sınıflandırma yaptıklarında deneye göre sıralamanın da değiştiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sıcak karışımlar üzerinde uygulanan deneylerden elde edilen sıralamalar birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Genel olarak, modifiyeli bitümlerin tekerlek izi dirençlerinin arttığını ifade etmişlerdir.

Domingos vd (2020), PPA ve Elvaloy ilavesinin tekerlek izi oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %2 PPA ve %1.6 Elvaloy + %0.5 PPA ilave ederek modifiyeli bitümleri hazırlamışlardır. Hazırladıkları modifiyeli bitümlerle sıcak karışım numuneleri de üretmişlerdir. Bitüm numunelerine MSCR deneyi, karışım numunelerine ise akma sayısı deneyi uygulamışlardır. Yaptıkları deney sonuçlarına göre hem bitüm olarak hem de karışım olarak en iyi sonuçları Elvaloy + PPA numuneleri ile elde etmişlerdir. Ayrıca, PPA modifiyeli bitümün MSCR deneyine göre saf bitümün sertliğini arttırdığını ancak PPA modifikasyonunun sıcak karışım numunesinin akma sayısı üzerinde etkisinin çok az olduğunu belirtmişlerdir.

Sadek vd (2020), yaptıkları çalışmada düşük sıcaklık katkı malzemelerinin BSK'ların yaşlanma ve çatlama dirençlerine etkisini incelemişlerdir. Bir polimer (SBS veya Elvaloy) ve bir düşük sıcaklık katkı maddesini (iki farklı ticari yağ) bitümün performans derecesini PG 58-34 olacak miktarda ilave ederek modifiyeli bitümleri hazırlamışlardır. Modifiyeli bitümlerden sıcak karışım numuneleri üreterek bu numuneleri fırında 6 saat ve 14 saat süreyle yaşlandırmışlardır. Bu numunelerin esneklik indekslerini (FI) belirlemişlerdir. Ayrıca, yaşlanmış numunelerin bitümlerini ayrıştırıp LAS deneyine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda FI değeri ile LAS-B parametresi arasında iyi bir ilişki olduğunu ($R^2=0.83$) bulmuşlardır.

Xu vd (2020), RET modifiyeli bitüme düşük sıcaklık performansını artırmak amacıyla farklı katkı malzemeleri ilave etmişlerdir. RET modifiyeli bitüm numunesini %1.5 Elvaloy ve %0.2 PPA ilave etmişlerdir. RET modifiyeli numuneye %8, 10, 12, 14, 16 PUP ilave ederek kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Ayrıca, sıcak karışım numuneleri hazırlayarak bunlara fiber ve öğütülmüş atık kauçuk (GWR) ilave ederek modifiyeli karışım numuneleri hazırlamışlardır. Bitüm numunelerine kuvvet düktilite, BBR, diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC), RV ve

MSCR deneyleri uygularken sıcak karışım numunelerine eğme kirişi, tekerlek izi, Marshall stabilite deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, tüm katkı maddelerinin RET modifiyeli sıcak karışımın düşük sıcaklık performansını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, her bir katkı maddesi için ayrı ayrı %10 PUP, %2.1 GWR ve %0.2 fiber ilavesinin optimum katkı miktarları olduğunu belirlemişlerdir.

Almusawi vd (2021), yaptıkları çalışmada PMB'lerin ve WMA ilaveli bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemede kullanılabilecek en uygun yöntemi araştırmışlardır. Çalışmalarında öncelikle, SBS, Elvaloy, kimyasal esaslı WMA ve organik esaslı WMA ile modifiye edilmiş bitüm numunelerine yüksek kesme oranı (HSR), sıfır kayma viskozite (ZSV) ve durgun hal akma (SSF) yöntemlerini uygulayarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemişlerdir. Ardından, modifiyeli bitümleri kullanarak sıcak karışım numuneleri hazırlamış ve bu numunelere dolaylı çekme dayanımı deneyi uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, en düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının ZSV metodu ile elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ancak bu yöntemden elde edilen sıcaklıklarda hazırlanan BSK'ların performansında düşüş meydana geldiğini belirlemişlerdir. Denenen yöntemler arasında karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde, PMB'ler için en uygun yöntemin HSR metodu, WMA modifiyeli bitümler için ise SSF metodu olduğunu ifade etmişlerdir.

2.5.2. Bitkisel Atık Yağlar ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümde literatürde erişilebilen ve bitkisel atık yağ kullanımını içeren çalışmaların bir kısmı kronolojik bir sırayla özetlenmiştir. Bitkisel atık yağların bitümü gençleştirme ve yumuşatma etkisi üzerinde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Asli vd (2012), geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalar (RAP) için atık yemeklik yağın gençleştirici olarak uygulanmasını incelemişlerdir. Hem yüksek sıcaklıkta karıştırarak hem de RTFO ile saf bitümü yaşlandırmışlardır. Yaşlandıkları bitüm numunelerini %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında atık yemeklik yağ ilave ederek gençleştirmişlerdir. Ürettikleri deney numunelerine; penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Karıştırarak yaşlandırdıkları numunelerin 60/70, 50/60, 40/50 ve 30/40 gibi farklı penetrasyon sınıflarında olduğunu RTFO ile yaşlandırılan numunelerin ise 50/60 penetrasyon sınıfında olduğunu belirlemişlerdir.

Yapılan çalışmanın sonucunda yaşlanmış bitümün atık yemeklik yağ ilavesiyle geliştirilerek yaşlanmamış haldeki fiziksel ve reolojik özelliklerinin geri kazanılabileceğini bulmuşlardır.

Zargar vd (2012), atık yemeklik yağın yaşlanmış bitümde geliştirici katkı malzemesi olarak kullanılma ihtimalini araştırmışlardır. 80/100 penetrasyon sınıfındaki bitümü belirli bir sıcaklıkta karıştırarak 40/50 penetrasyonlu yaşlanmış bir bitüm elde etmişlerdir. Bu bitüme, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında atık yemeklik yağ ilave ederek geliştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR ve FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, yaşlanmış bitüme %3-4 oranları arasında atık yemeklik yağ ilave edildiğinde bu bitümün saf halindeki özelliklere erişilebileceğini belirtmişlerdir.

Chen vd (2014a) yaptıkları çalışmada, bitkisel atık yağ ile geliştirilmiş bitümlerin fiziksel, kimyasal ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Biri 60/80 penetrasyonlu diğeri 40/60 penetrasyonlu olmak üzere iki farklı saf bitümü ve bir SBS modifiyeli bitümü RTFO ve PAV deneyleri ile yaşlandırmışlardır. Yaşlandırdıkları kontrol numunelerine ağırlıklarınca, %3, %4, %5, %6, %7 oranlarında bitkisel atık yağ ilave ederek geliştirilmiş bitüm numuneleri elde etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV, DSR, DSC, FT-IR, SARA fraksiyonlarına ayırma deneyleri uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda, bitkisel atık yağın bitümü etkin bir şekilde yumuşatabildiğini belirlemişlerdir. Aynı zamanda yaşlandırılmış üç farklı bitüm numunesine de optimum miktarda bitkisel atık yağ ilave edildiğinde bu üç yaşlandırılmış bitümün yaşlanmadan önceki haline ait özelliklerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Chen vd (2014b), bitümün bir geliştirici, atık yağ ve pamuk tohumu yağı ile modifiye edilmesiyle yüksek sıcaklıktaki özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamadan çıkartılan bir bitüme ağırlığınca, %5 ve %10 oranlarında katkı malzemesi ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu modifiyeli bitüm numunelerinin %25'ini ise saf bitüm oluşturmaktadır. Hazırladıkları numunelere, DSR ve RV deneyi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, atık yağ ilavesiyle tekerlek izi direncinin ve kompleks modülün azaldığını faz açısının ise arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, atık yağ

ilavesinin viskoziteyi azalttığını ve bu durumun karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşüreceğini ifade etmişlerdir.

Yu vd (2014) yaptıkları çalışmada, gençleştirilen bitümler üzerindeki reolojik, mikroskobik ve kimyasal etkisini incelemişlerdir. PG 58-28 sınıfındaki saf bitümü önce yapay yöntemlerle yaşlandırmış ardından %12 oranında bitkisel atık yağ ilave ederek gençleştirmişlerdir. Bu üç haldeyken numunelere deneyler uygulamışlardır. Numunelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde DSR, BBR; mikroskobik özelliklerinin belirlenmesinde AFM ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde SARA fraksiyonlarına ayırma deneylerinden faydalanmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda gençleştirilmiş numunelerinin reolojik özelliklerinden elde edilen sonuçların, yaşlanmış ve saf bitüm numunelerinden elde edilen sonuçların arasında olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, yaşlanma ve gençleştirme olaylarının bitümün morfolojisinde değişime yol açtığını ancak gençleştirmeden sonra elde edilen morfolojik dokunun her zaman saf bitüm ile benzer olmadığını ifade etmişlerdir.

Zaumanis vd (2014), tamamı geri dönüştürülmüş asfalt kaplamadan (RAP) üretilen numuneleri altı farklı gençleştirici ile modifiye edilmiş bunların karışımların performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. RAP'tan çıkartılmış bitüme içerisinde bitkisel atık yağın da bulunduğu altı farklı gençleştiriciyi %12 oranında ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu numuneleri, PG 64-22 saf bitüm ile kıyaslamışlardır. Ayrıca, modifiyeli bitümler kullanarak sıcak karışım numuneleri de üretmişlerdir. Hazırladıkları bitüm numunelerine; DSR, BBR, RV deneyleri, karışım numunelerine ise çekme dayanımı, sünme uyumu, tekerlek izi, kritik çatlama sıcaklığı deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; saf bitüm ile hazırlanan numuneler ile kıyaslandığında modifiyeli tüm numunelerin daha iyi tekerlek izi direnci, daha uzun yorulma ömrü ve daha düşük kritik çatlama sıcaklıkları sergilediğini belirlemişlerdir. Bununla birlikte, gençleştirilen numunelerin daha fazla sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyduğunu ve bazı yağların nem hasarına karşı direnci az miktarda düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Maharaj vd (2015), atık yağ modifiyeli Trinidad'daki bitümlü malzemelerin tekerlek izine ve yorulmaya karşı dirençlerini incelemişlerdir. Tamamı Trinidad doğal asfaltı (TLA), tamamı Trinidad'daki bir rafineride üretilen bitüm (TPB) ve yarısı TLA yarısı TPB olan üç farklı bitüme %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere DSR deneyi uygulayarak tekerlek izine ve

yorulmaya karşı dirençlerini analiz etmişlerdir. Yaptıkları deney sonuçlarına göre, modifiyeli bitüm içerisindeki atık yağ miktarı arttıkça bitümlerin tekerlek izine karşı dirençlerinde azalma, yorulmaya karşı dirençlerinde ise artma meydana geldiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, TLA ve TPB karışımına atık yağ ilavesiyle elde edilen modifiyeli bitüm ile elde edilen sonuçların diğer numunelerin arasında kaldığını ifade etmişlerdir.

Azahar vd (2016a) yaptıkları çalışmada bitüm modifikasyonunda atık yağın performansını incelemişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme %3, %4, %5 oranlarında asitlik oranları birbirlerinden farklı atık yağlar ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda en düşük asitlik değerine sahip atık yağ ile modifiye edilen bitümün tekerlek izine karşı en yüksek direnci sergilediğini belirtmişlerdir.

Azahar vd (2016b), bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla atık yağları bitüme katmadan önce kimyasal olarak modifiye etmişlerdir. Atık yağı, asitlik oranını düşürmek amacıyla transesterifiye etmişlerdir. Böylece elde ettikleri işlenmiş atık yağları bitüme %3, %4, %5 oranlarında ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Kontrol numunesi olarak ise aynı oranlarda işlenmemiş atık yağ kullanılarak modifiye edilmiş bitümleri kullanmışlardır. Hazırladıkları bu numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR, FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda, işlenmiş atık yağ ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi direncinin işlenmemiş atık yağ ile modifiyeli bitüme kıyasla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Azahar vd (2017), işlenmiş ve işlenmemiş atık yağ içeren asfalt karışımların mekanik performansını incelemişlerdir. %5 oranında işlenmemiş atık yağ ile kontrol karışımı oluşturmuşlar ve %5 işlenmiş yağ ilaveli karışımda elde ettikleri sonuçları kontrol karışımı ile kıyaslamışlardır. Hazırladıkları karışım numunelerine, Marshall stabilite, esneklik modülü, sünme rijitliği ve dolaylı çekme deneyleri uygulamışlardır. Ayrıca, atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ile adezyon özelliklerini belirlemek amacıyla mikrodoku incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, işlenmiş atık yağ ilavesiyle numunelerin; Marshall stabilite, esneklik modülü ve dolaylı çekme performansında bir artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca, AFM

gözlemleriyle işlenmiş atık yağ ilavesinin karışımın adezyonunu güçlendirdiğini belirlemişlerdir.

Dokandari vd (2017), geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarla (RAP) atık yağların uygulanmasını incelemişlerdir. Yaşlanmış asfalt karışımı gençleştirmek amacıyla iki farklı atık yağ (atık motor yağı ve bitkisel atık yağ) ilave etmişlerdir. Hazırlanan karışımdaki RAP içeriğine bağlı olarak, optimum atık yağ ilave miktarı belirlemişlerdir. Hazırladıkları numunelere, Marshall stabilite, akma ve dolaylı çekme deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda atık yağ ilavesi ile kaplama inşaatında kullanılacak RAP yüzdesinin arttırılabileceğini belirlemişlerdir.

Eriskin vd (2017), atık kızartma yağları ile modifiye edilmiş bitümlerin sıcak karışımlarda kullanımını araştırmışlardır. Saf bitüm ve atık yağ modifiyeli bitüm kullanarak BSK numuneleri hazırlamışlardır. BSK'ların optimum bitüm miktarını belirlemek için Marshall dizayn metodundan faydalanmışlardır. Ayrıca, hazırladıkları bitüm numunelerine penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, karışım numunelerine ise dolaylı çekme deneyi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, atık yağ kullanımının sıcak karışımdaki optimum bitüm miktarını %5.125'ten %4.575'e düşürdüğünü belirlemişlerdir. Bu sebeple, atık yağ kullanılarak inşa edilecek yolların daha az bitüm kullanımı gerektireceği için sürdürülebilir olacağını belirtmişlerdir.

Ji vd (2017) yaptıkları çalışmada, bitkisel yağların bitümler için gençleştirici olarak etkinliğini incelemişlerdir. Geri dönüştürülmüş bir asfalt kaplamadan çıkartılan bitüme biri mısır diğer soya kökenli iki farklı bitkisel atık yağı bitüm ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere DSR, BBR ve RV deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, atık yağ ilavesinin yaşlanmış bitümün viskozitesini ve sertliğini düşürdüğünü belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklardaki performans kaybını göz önüne alarak, gençleştirme amacıyla ilave edilmesi gereken atık yağ oranının %6 ile %8 arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Singh-Ackbarali vd (2017), çevre kirliliğine bir çözüm olarak kullanılmış kızartma yağlarının kaplama içerisinde kullanılma ihtimalini incelemişlerdir. Trinidad gölü doğal asfaltına (TLA) ve Trinidad'daki bir petrol rafinerisinden temin edilen saf bitüme (TPB) ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 kullanılmış kızartma yağı (UFO) ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere DSR deneyi uygulayarak reolojik

özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, TLA ve TPB'ye UFO ilavesiyle bitümlerin sertliklerinin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, UFO ilavesinin bitümün tekerlek izine karşı direncini azaltırken yorulma direncini arttırdığını belirlemişlerdir.

Al-Omari vd (2018), Superpave şartnamesini esas alarak bitkisel atık yağ ile modifiye edilmiş bitümün kullanılabilirliğini incelemişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %1, %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, düktilite, RV, DSR ve BBR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, uygun miktarda atık yağ ilavesi ile saf bitümün birçok özelliğinin iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Bu sebeple, atık yağların yasal olarak yok edilmesi için bitüm modifikasyonunda kullanılmalarının uygun bir yöntem olacağını ifade etmişlerdir.

Rasman vd (2018) yaptıkları çalışmada, biyoyağlar ile modifiye edilmiş bitümlerin mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. 80/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %1, %2, %3 oranlarında atık yemeklik yağ ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, ısıtmada kütle kaybı ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, atık yemeklik yağ ilavesiyle saf bitümün penetrasyon değerinin arttığını yumuşama noktasının ise azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, saf bitüme %2 oranında atık yemeklik yağ ilavesinin yüksek sıcaklık sınıfını düşürmediğini belirlemişlerdir.

Xinxin vd (2018) yaptıkları çalışmada, bitkisel atık yağın yaşlanmış bitümler için gençleştirici olarak kullanılabilme ihtimalini incelemişlerdir. 70 penetrasyonlu bitümü öncelikle RTFO ve PAV deneyleriyle yaşlandırmış, ardından bitüm ağırlığınca %5, %10, %15, %20 oranlarında serbest yağ asitlerinden arındırılmış bitkisel atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları bitüm numunelerini; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, DSR, BBR ve MSCR deneylerine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda yaşlandırılmış bitüm numunesine saf halindeki özellikleri geri kazandırmak amacıyla ilave edilmesi gereken optimum bitkisel atık yağ oranını %13.4 olarak belirlemişlerdir.

Wang vd (2019), atık yemeklik yağdan biyodizel üretimi esnasında açığa çıkan atık biyoyağ ile modifiye edilmiş bitümün kimyasal ve reolojik özelliklerini

incelemişlerdir. 60/80 penetrasyonlu saf bitüme %1, %3, %5 oranlarında biyoyağ ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelere; SARA fraksiyonlarına ayırma, GPC, termogravimetrik analiz (TGA), MSCR, doğrusal genlik taraması ve elastik geri kazanım deneyleri uygulanmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda, biyoyağ ilavesinin tekerlek izi direncini azalttığını ve elastik geri kazanım kabiliyetini küçük bir miktarda düşürdüğünü belirlemişlerdir. Bununla birlikte, biyoyağ ilavesi yorulma çatlaklarına karşı ve yaşlanmaya karşı direncin artmasını sağlamıştır. Ayrıca, biyoyağ modifiyeli bitümlerin kimyasal ve reolojik özellikleri arasındaki korelasyonun, bitümler için koloidal modele dayanan çıkarımlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Durga Prashanth vd (2019), taş mastik kaplamaların geri dönüştürülmesinden elde edilen bitümlerde gençleştirici kullanımının etkisini incelemişlerdir. 50/70 penetrasyonlu bitüme %2, %4, %6 oranlarında, atık motor yağı, bitkisel atık yağ ve parçalanmış plastik gençleştiricilerinden birini ilave ederek bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bunlara; RV, DSR ve FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Ayrıca, modifiyeli bitümler kullanarak taş mastik asfalt numuneleri hazırlayıp Marshall stabilite deneyine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları incelemeler sonucunda optimum gençleştirici miktarını atık yağlar için %6, parçalanmış plastik için %2 olarak belirlemişlerdir.

Cavdar vd (2019), SBS modifiyeli bitümlerde bitkisel atık yağ kullanımının etkisini incelemişlerdir. %5 oranında SBS modifiyeli bitüme %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarında bitkisel atık yağ ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bunlara; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, RV deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, SBS modifiyeli bitüme atık yağ ilavesinin, modifiyeli bitümün işlenebilirliğini arttırdığını, böylece plente BSK hazırlanırken gereken enerji miktarının azaltılabileceğini ifade etmişlerdir.

El-Shorbagy vd (2019), sürdürülebilir kaplamaların inşa edilebilmesi için yaşlanmış bitümlerin atık yağlar ile gençleştirilmesini araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş bir asfalt kaplamadan çıkartılan bitüme %2, %3, %3.5 ve %4 oranlarında atık yemeklik yağ veya atık motor yağı ilave etmişlerdir. Hazırladıkları bitüm numunelerine; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR, BBR, FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Bitüm deneyleri sonucunda, %3.5 atık yağ ilavesiyle yaşlanmış bitümün tekerlek izi parametresinin saf bitümünkine denk olduğunu

belirlemişlerdir. Ayrıca, atık yağ ilaveli geri dönüştürülmüş bitüm içeren sıcak karışım numuneleri hazırlayarak Marshall stabilite, dolaylı çekme dayanımı deneylerine tabi tutarak bölgesel şartname koşullarına uygunluklarını test etmişlerdir. Bunun sonucunda, bu modifikasyonla elde edilen kaplamaların ağır trafikli bölgelerde kullanıma uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Gokalp ve Uz (2019), bitkisel atık yağın bitüm ile birlikte kullanımını sıfır tolerans yaşlanma yaklaşımı ile incelemişlerdir. RTFOT, PAV ve oksijenle yaşlandırma metotlarıyla yaşlandırılmış 70/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında bitkisel atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR ve BBR deneyleri uygulamışlardır. Optimum atık yağ miktarının belirlenebilmesi için yaşlanma indeksinden faydalanarak sıfır tolerans yaşlanma yaklaşımını geliştirmişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda kısa dönemli yaşlanmış numuneler için az miktarda, uzun dönemli yaşlanmış bitümler için ise fazla miktarda bitkisel atık yağ ilavesi ile bu bitümlerin gençleştirilmesinin mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Joni vd (2019) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş asfalt kaplamadan çıkarılan bitümü gençleştirmek amacıyla bitkisel atık yağ ve atık motor yağı kullanımını araştırmışlardır. 25/30 penetrasyonlu 6 yıl boyunca sahada kullanılan kaplamadan çıkartılmış bitüme %1, %2, %3 oranlarında bitkisel atık yağ veya atık motor yağı ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bunlara; penetrasyon, düktilite, yumuşama noktası, FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları deney sonuçlarına göre 25/30 penetrasyonlu yaşlanmış bitüme, %1 bitkisel atık yağ veya %3 atık motor yağı ilavesinin 40/50 penetrasyonlu saf haline dönmesi için yeterli olduğunu belirlemişlerdir.

Li vd (2019) yaptıkları çalışmada, yaşlanmış bitümün performansını atık motor yağı ve atık yemeklik yağ ilave ederek iyileştirmeyi amaçlamışlardır. 70 penetrasyonlu saf bitümü TFO deneyi ile farklı sürelerle yaşlandırmışlardır. Bu bitüme, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında atık yağ ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, DSR, FT-IR ve SEM deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları deneylerin sonucunda, atık motor yağı ve atık yemeklik yağ ilavesiyle bitümün yumuşayacağını ve işlenebilirliğini artacağını göstermişlerdir. Bununla birlikte, atık yemeklik yağ ilavesi

ile elde edilen reolojik iyileştirmelerin, atık motor yağına kıyasla daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Nordiana vd (2019), yaptıkları çalışmada işlenmiş ve işlenmemiş atık yağ ile modifiyeli bitümlerin tekerlek izi dirençlerini incelemişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %3, %4, %5 oranlarında atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda, %5 oranında işlenmiş atık yağ ilavesiyle elde edilen tekerlek izi parametresi değerinin saf bitümünkine denk olduğunu bulmuşlardır.

Adesina ve Dahunsi (2020), yaptıkları çalışmada HDPE ve atık yağ ile modifiye edilmiş bitümlerin fiziksel karakteristiklerini incelemişlerdir. 60/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %5, %10, %15 oranlarında atık yağ, %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında HDPE ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelere; penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre saf bitüme %7.5 HDPE ve %15 atık yağ ilavesinin penetrasyonu %9.3 düşürdüğünü yumuşama noktasını ise %54.7 arttırdığını belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, atık yağ ile modifiye edilmiş bitümler için HDPE'nin bir stabilize edici olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Liu vd (2020), SBS, EVA ve atık yağ kompozit modifiyeli bitümün fizikokimyasal ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. 80/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığınca %3,5 SBS, %5,5 EVA ve %5, %10 atık yağ ilave ederek kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlamışlardır. Bu numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, TFO, PAV, DSR, BBR, depolama stabilitesi, gaz kromatografisi-kütle spektroskopisi, jel permeasyon kromatografisi ve FT-IR deneyleri uygulamışlardır. Deneyler sonucunda, saf bitüme EVA ve SBS ilavesinin performansı arttırdığını ancak, depolama stabilitesini düşürdüğünü bulmuşlardır. Ayrıca, atık yağ ilavesiyle yüksek sıcaklık performansında bir düşüş meydana gelmesine rağmen düşük sıcaklık performansının ve yorulma direncinin arttığını belirtmişlerdir. Buna ilaveten, atık yağın bitüm içerisinde polimerlerin dağılımını kolaylaştırdığını açıklamışlardır.

Nie vd (2020), yüksek miktarda SBS kullanılarak modifiye edilmiş bitümlerde uyumlaştırıcı olarak atık biyoyağ kullanımını incelemişlerdir. 70 penetrasyonlu saf bitüme %4 oranında yağ, %8 oranında SBS ilave ederek modifiyeli bitüm numuneleri

hazırlamışlardır. Bunlara; penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, elastik geri kazanım, RV ve DSR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, atık biyoyağ ile PMB'nin elastisitesinin ve esnekliğinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, yağ ilavesiyle PMB'nin yaşlanmaya karşı direncinin de gözle görülür bir şekilde arttığını ifade etmişlerdir.

Rodrigues vd (2020) yaptıkları çalışmada, bitümü şehir atık malzemeleri olan LDPE ve bitkisel atık yağ ile modifiye ederek tamamen çevreci bir bitüm üretmeyi amaçlamışlardır. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplamadan (RAP) elde edilen karışım numunelerini kullanmışlardır. RAP'tan çıkarılan bitüme %0.3-1.5 oranında 35/50 penetrasyonlu saf bitüm ilave etmişlerdir. Daha sonra toplam bitüm ağırlığınca %4, %8, %16, %18, %20 oranlarında bitkisel atık yağ ve %2, %4, %6 ve %8 oranlarında LDPE ekleyerek modifiyeli bitümler ve sıcak karışımlar üretmişlerdir. Hazırladıkları sıcak karışım numunelerini Marshall stabilite, dört-noktalı eğme, tekerlek izi ve dolaylı çekme deneylerine tabi tutmuşlardır. Çalışmanın sonucunda, LDPE ve bitkisel atık yağ kullanılarak modifiye edilmiş RAP'ların düşük ve orta trafikli bölgelerde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Uz ve Gökalp (2020), yaşlanmış bitümün gençleştirilmesi için gerekli olan optimum bitkisel atık yağ miktarını belirleyebilmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, kısa ve uzun dönemli yaşlandırılmış 70/100 penetrasyon sınıfındaki saf bitümlere ağırlığınca %2, %4, %6, %8, %10 oranlarında bitkisel atık yağ ilave etmişlerdir. Hazırladıkları numunelere; penetrasyon, yumuşama noktası, RV, RTFO, PAV, DSR ve BBR deneyleri uygulamışlardır. Yaptıkları deneylerden optimum bitkisel atık yağ miktarını belirleyebilmek amacıyla "Saf Gençleştirme İndeksi (PRI)" üretmişlerdir. PRI analizleri sonucunda, kısa dönemli yaşlanmış bitümler için %3, uzun dönemli yaşlanmış bitümler için ise %6 bitkisel atık yağ ilavesinin optimum miktar olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, optimum miktarın incelenen deney yöntemine göre değişiklik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

%1.5 RET ve %0.2 PPA modifiyeli bitümün işlenebilirliğini arttırmak ve düşük sıcaklıklardaki esnekliğini geliştirmek amacıyla yürütülen bu çalışmada, RET modifiyeli bitüme %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilave edilerek kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin içerisindeki malzemeler ve bu numunelere uygulanan deneysel yöntemler aşağıda belirtilip bu bölümün alt başlıklarında detaylı olarak anlatılmıştır.

Kullanılan Malzemeler:

- 50/70 penetrasyon sınıflı bitüm
- Elvaloy RET 5160 ve PPA
- Bitkisel Atık Yağ

İzlenen Yöntem:

a) Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Deneyler:

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

b) Reolojik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Deneyler:

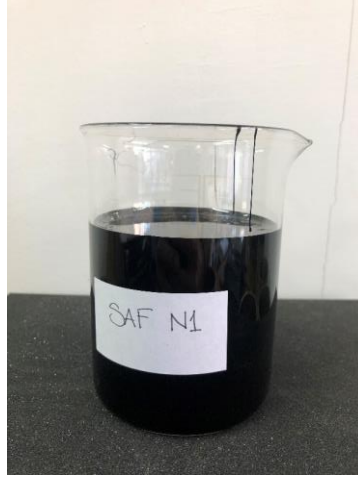
- RTFOT
- PAV
- RV
- DSR
- BBR

c) Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Deneyler:

- FT-IR
- TGA

3.1. Modifiyeli Bitüm Numunelerinin Hazırlanması

Modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanması çalışmanın ilk aşamasıdır. Çalışmanın başlangıcı için gerekli olan saf bitüm için, 50/70 penetrasyon sınıfında ve Kırıkkale petrol rafinerisinde üretilmiş saf bitüm (Şekil 3.1) tercih edilmiştir. Bunun sebebi, literatürde RET ile kullanılan bitümlerin penetrasyon sınıfları ve katkı malzemesinin temin edildiği firmanın yetkililerince verilen tavsiyelerdir. Bu doğrultuda, KGM 7. Bölge Müdürlüğü ile iletişime geçilerek ilgili yetkililerin yardımıyla belirtilen özelliklerdeki saf bitümün temini sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Kırıkkale petrol rafinerisinde üretilmiş 50/70 penetrasyon sınıfı saf bitüm numunesi

Çalışmanın bir diğer anahtar malzemesini ise RET oluşturmaktadır. RET piyasada güncel bir malzemedir ve Elvaloy RET ticari adıyla bulunabilmektedir. Dow Chemicals firmasının üreticiliğini üstlendiği Elvaloy RET'in, Türkiye'deki distribütörlüğünü Komsa Makine Dış-Ticaret Temsilcilik firması gerçekleştirmektedir. Bu sebeple Komsa firması ile iletişime geçilerek malzeme temini talebinde bulunulmuştur. İlgili firmadan Evaloy'un en güncel sürümlerinden olan Elvaloy® RET 5160 ürünü alınmıştır. Elvaloy RET 5160 (Şekil 3.2), hafif beyazımsı, saydam renkli, küçük top halinde, plastik benzeri bir malzemedir ve teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Elvaloy RET 5160'ın teknik özellikleri (Dow, 2021)

Özellik	Standart	Sayısal Değerler
Çekme Dayanımı	ASTM D638	3653 psi
Kopmadaki Uzama	ASTM D638	%718
Yoğunluk	ASTM D792	0.95 g/cm ³
Erime Akış Hızı (190 °C/2.16 kg	ASTM D1238	12 g / 10 dk
Erime Noktası (DSC)	ASTM D3418	80 °C
Donma Noktası (DSC)	ASTM D3418	55 °C
En Yüksek İşlenme Sıcaklığı	-	220 °C



Şekil 3.2. Elvaloy RET 5160

Literatür araştırması sonucunda, RET'in PPA ile kullanımının daha faydalı sonuçlar verdiği ve sadece RET ile modifiye edilmiş bitümlere kıyasla hem RET hem de PPA kullanılarak modifiye edilmiş bitümlerin daha iyi performans sergilediği anlaşılmıştır. Bu doğrultuda, polimer modifiyeli bitümün hazırlanmasında sadece RET değil hem RET hem de PPA'nın kullanılmasına karar verilmiştir. PPA, malzemesinin temini de KOMSA firması tarafından sağlanmıştır. PPA, saydam renkli su benzeri fakat suya kıyasla daha kıvamlı bir malzemedir. Çalışmada kullanılan PPA'ya ait bir numune Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. PPA

Bu çalışmanın anahtar malzemesini ise bitkisel atık yağ oluşturmaktadır. Bu yağlar, restoran ve evler gibi kızartma yağlarının kullanıldığı yerlerden atık yağların toplanılıp filtrelenmesi ile üretilmektedir. Bu işlemleri gerçekleştiren çeşitli firmalar mevcuttur. Bu firmalardan biri olan ve topladığı yağları çeşitli kimyasal işlemlerle yurtdışında biyodizel üretiminin hammaddesi haline getiren DEGAM YAĞ ve KİMYA SAN. LTD. ŞTİ. firması ile malzeme temini için iletişime geçilmiştir. İlgili firmadan sadece filtreleme işlemine tabi tutulmuş bitkisel atık yağ malzemesi temin edilmiştir. Bu malzemeye ait bir numunenin görüntüsüne Şekil 3.4'te yer verilmiştir.



Şekil 3.4. Filtrelenmiş bitkisel atık yağ

Tüm malzemeler temin edildikten sonra, modifiyeli bitümlerin hazırlanmasında kullanılacak katkı malzemesi oranları belirlenmiştir. Sabit oranda RET ve PPA ilavesi kullanılarak RET modifiyeli bitüm numuneleri hazırlanacağı için burada tercih edilen oranlar literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda, saf bitümün ağırlığınca %1.5 Elvaloy RET 5160 ve %0.2 PPA ilavesine karar verilmiştir. Diğer yandan bitkisel atık yağ ilavesi farklı oranlarda katılacağı için sadece mertebesinin literatür ile uyumlu olmasına özen gösterilmiş ve bunun sonucunda, yüzde mertebesinde, RET modifiyeli bitüm ağırlığınca %2, %4, %6 ve %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilavesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

Çalışma içerisinde kullanılacak katkı oranlarına karar verildikten sonra bu oranlardan faydalanılarak modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanılmasına başlanmıştır. Karışımların hazırlanması öncelikle RET modifiyeli bitüm numunelerinin üretilmesi ve ardından bu numunelere farklı oranlarda bitkisel atık yağ ilave edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç olarak, saf bitüm akışkan hale gelinceye kadar ısıtılmıştır. Saf bitümün aktarılacağı 800 mL hacimli beherler boş halde tartılmış daha sonrasında bunları

içerisine yaklaşık 400 mL hacminde saf bitüm eklenerek tekrar ağırlıkları belirlenmiştir. Bu aşamada iki adet beher, deneylerde saf bitüm numunesi temsil etmek üzere kenara ayrılmıştır.

Karıştırma işlemi için dört kollu mekanik karıştırıcıdan yararlanılmış ve bu karıştırıcının altına numunenin ısınmasını sağlamak amacıyla ısıtıcı tabla yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Beher içerisindeki saf bitüm akışkan hale gelinceye kadar ısıtılıp 180°C sıcaklıkta ve 1000 dev/dk hızda karıştırma işlemine başlanmış ve bu esnada Elvaloy RET ilavesi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi sabit koşullarda 2 saat süreyle devam ettirilmiştir. Bu süre tamamlandıktan sonra, karıştırma koşullarında herhangi bir değişiklik yapılmadan PPA ilave edilmiş ve karıştırma işlemine ilave 30 dk devam edilmiştir. Bu sürenin sonunda ise hazırlanan RET modifiyeli bitüm numuneleri 90 dk süreyle 180°C sıcaklıktaki etüvde kür işlemine tabi tutulmuştur. Kür sonrasında RET modifiyeli numunelerinin hazırlanması tamamlanmıştır. Bitkisel atık yağ ilavesine geçilmeden önce tüm numuneleri için RET modifiyeli bitümler hazırlanmıştır.



Şekil 3.5. Mekanik karıştırıcı ile modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanması

Bitkisel atık yağ ilavesinde öncelikle hazırlanmış RET modifiyeli bitüm akışkan hale gelene kadar ısıtılmıştır. Ardından, 150°C sıcaklıkta ve 1000 dev/dk karıştırma hızında karıştırma işlemine başlanmış ve bitkisel atık yağ ilavesi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma koşulları sabitken 30 dk süreyle karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu sürenin ardından bitkisel atık yağ içeren kompozit modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanma işlemi tamamlanmıştır.

Modifiyeli bitüm numunelerinin hazırlanması esnasında takip edilen sürecin daha kolay anlaşılabilmesi için karıştırma parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Elde edilen karışımlar içerisinde birden fazla katkı malzemesi bulundurduğu için hazırlanan numunelerin, katkı malzemelerinin isimleri ve oranları ile adlandırılmaları uzun isimlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, hazırlanan modifiyeli bitüm numuneleri, her birine kısa isimler verilerek, kodlandırılmıştır. Bu kodlar Tablo 3.3’te gösterilmiştir ve çalışmanın devamında bu isimlendirmeler kullanılacaktır.

Tablo 3.2. Karışım hazırlama parametreleri

Elvaloy RET 5160 ilavesi	
Karıştırma sıcaklığı	180 °C
Karıştırma süresi	2 saat
Karıştırma hızı	1000 dev/dk
Katkı oranı	%1.5 (saf bitüm ağırlığınca)
PPA ilavesi	
Karıştırma sıcaklığı	180 °C
Karıştırma süresi	30 dakika
Karıştırma hızı	1000 dev/dk
Katkı oranı	%0.2 (saf bitüm ağırlığınca)
Kür işlemi*	
Kür Sıcaklığı	180 °C
Kür Süresi	90 dakika
Bitkisel atık yağ ilavesi	
Karıştırma sıcaklığı	150 °C
Karıştırma süresi	30 dakika
Karıştırma hızı	1000 dev/dk
Katkı oranı	%2, %4, %6, %8 (PMB ağırlığınca)

* kür işlemi sonrasında PMB numunelerinin hazırlanması tamamlanmıştır.

Tablo 3.3. Numune kodları

Kombinasyon İçeriği	Numune Kodu
50/70 Saf Bitüm	SAF
50/70 Saf Bitüm + %1.5 RET + %0.2 PPA	RET
50/70 Saf Bitüm + %1.5 RET + %0.2 PPA + %2 Bitkisel Atık Yağ	RET+2Y
50/70 Saf Bitüm + %1.5 RET + %0.2 PPA + %4 Bitkisel Atık Yağ	RET+4Y
50/70 Saf Bitüm + %1.5 RET + %0.2 PPA + %6 Bitkisel Atık Yağ	RET+6Y
50/70 Saf Bitüm + %1.5 RET + %0.2 PPA + %8 Bitkisel Atık Yağ	RET+8Y

Karışımlar hazırlanırken her bir karışım kombinasyonu için iki adet numune hazırlanmıştır ve bu numuneler, kodlarına N1 ve N2 ilave edilerek belirtilmiştir. Tablo 3.4’te karışımlar hazırlanırken hem bitüm numunelerine hem de katkı malzemelerine ait ağırlık ölçümleri ve katkı oranı hesaplamaları verilmiştir.

Tablo 3.4. Karışım kombinasyonları

KOD	Beher Hacmi (mL)	Beher Ağırlığı (gr)	Beher + Bitüm Ağırlığı (gr)	Bitüm Ağırlığı (gr)	%1,5 RET Ağırlığı (gr)	%0,02 PPA Ağırlığı (gr)	PMB Beher Ağırlığı (gr)	PMB + Beher Ağırlığı (gr)	PMB Ağırlığı (gr)	Bitkisel Atık Yağ Ağırlığı (gr)	İlave Edilen RET (gr)	İlave Edilen PPA (gr)	İlave Edilen Bitkisel Atık Yağ (gr)	Hata Yüzdesi - RET (%)	Hata Yüzdesi - PPA (%)	Hata Yüzdesi - Bitkisel Atık Yağ (%)
PMB N1	600	184.960	646.533	461.573	6.924	0.923	-	-	-	-	6.933	0.923	0.923	0.14	-0.02	-0.02
PMB N2	600	177.356	606.578	429.222	6.438	0.858	-	-	-	-	6.442	0.872	0.872	0.06	1.58	1.58
PMB+2Y N1	800	216.461	664.852	448.391	6.726	0.897	660.164	443.703	8.874	6.728	6.728	0.897	8.910	0.03	0.02	0.41
PMB+2Y N2	800	211.576	660.586	449.010	6.735	0.898	666.623	455.047	9.101	6.741	6.741	0.885	9.117	0.09	-1.45	0.18
PMB+4Y N1	800	212.364	664.608	452.244	6.784	0.904	668.082	455.718	18.229	6.783	6.783	0.962	18.226	-0.01	6.36	-0.01
PMB+4Y N2	800	217.639	658.855	441.216	6.618	0.882	665.067	447.428	17.897	6.624	6.624	0.872	17.895	0.09	-1.18	-0.01
PMB+6Y N1	800	216.306	649.264	432.958	6.494	0.866	654.945	438.639	26.318	6.494	6.494	0.910	26.412	-0.01	5.09	0.36
PMB+6Y N2	800	216.954	654.946	437.992	6.570	0.876	661.111	444.157	26.649	6.575	6.575	0.865	26.760	0.08	-1.25	0.41
PMB+8Y N1	800	218.768	662.781	444.013	6.660	0.888	669.048	450.280	36.022	6.660	6.660	0.990	36.039	0.00	11.48	0.05
PMB+8Y N2	800	218.058	650.590	432.532	6.488	0.865	656.717	438.659	35.093	6.492	6.492	0.872	35.110	0.06	0.80	0.05

3.2. Modifiyeli Bitümlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

3.2.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi, bitümün kıvamlılığını, başka bir ifadeyle sertliğini belirlemek için kullanılan bir deney metodudur. Deneyin yürütülmesinde TS EN 1426 (2015) veya ASTM D5 (2020) standartlarından yararlanılmaktadır. Bu deneyde, belirli ölçülere sahip standart bir iğnenin, 25 °C sıcaklıkta, 100 g ağırlık altında, 5 saniyelik bir zaman diliminde bitüm numunesinin içerisine batma mesafesi belirlenir. Belirlenen mesafe milimetrenin onda biri cinsinden ifade edilir ki bu birim desimilimetre (dmm) olarak adlandırılır. Bu değer, bitüm numunesinin penetrasyon değerini belirtir ve bitümlerin fiziksel olarak sınıflandırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Penetrasyon değerinin artması, bitüm numunesinin yumuşaması ve kıvamlılığının azalması anlamına gelirken, azalması, bitüm numunesinin sertleşmesi ve kıvamlılığının artması anlamına gelmektedir (Oruc ve Yılmaz, 2016). Penetrasyon deneyi penetrometre (Şekil 3.6) kullanılarak gerçekleştirilir.



Şekil 3.6. Penetrasyon cihazı (penetrometre)

Deneyin yapılışı:

Deneye tabi tutulacak bitüm numunesi öncelikle akışkan hale gelene kadar ısıtılır. Akışkan haldeki bitüm numunesinin bir kısmı penetrasyon kabına aktarılır ve oda sıcaklığına kadar soğuması için 45-120 dakika bekletilir. Buradaki süre penetrasyon kabının boyutuna göre değişmektedir. Orta boydaki penetrasyon kapları (55 x 35 mm) için 60-90 dakikalık bir süre yeterli olmaktadır. Numune oda sıcaklığına

geldikten sonra deneyde kullanılacak taşıma kabı ile birlikte 25°C sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir (Şekil 3.7). Su banyosu içerisinde 45-120 dakika bekletilen numune deneyin yürütülmesi için hazır hale gelir. Buradaki süre de, yine bir önceki durumda olduğu gibi numune kalıbının boyutu ile alakalıdır.



Şekil 3.7. 25°C'lik su banyosundaki bitüm numunesi dolu penetrasyon kapları ve taşıma kabı

Numune, taşıma kabı ile birlikte penetrometre cihazına yerleştirilir. Penetrasyon iğnesini taşıyan kol aşağı veya yukarı yönde hareket ettirilerek penetrasyon iğnesinin ucu, bitüm numunesin üst yüzeyine yaklaştırılır. Cihazın yan tarafından tutulan bir ışık kaynağı (Şekil 3.8) ile bitüm numunesinin yüzeyinde penetrasyon iğnesinin gölgesi oluşturulur. Bu gölge ile iğne ucu temas ettiği anda kol sabitlenir. Ardından kol serbest bırakılarak 5 saniyelik süre için iğnenin bitüm numunesine 100 g ağırlık altında serbest batması sağlanır. Süre sonunda batma miktarı belirlenir. Ardından mevcut iğne çıkartılıp yerine yedek iğne takılarak aynı işlem tekrarlanır ve aynı numuneden ikinci penetrasyon değeri alınır. Benzer şekilde, bir numune için üç farklı penetrasyon değeri okuması yapılır ve bunların ortalaması o numuneye ait penetrasyon değerini verir. Fakat bu üç değer arasındaki farkın büyüklüğü şartnamelerde sınırlandırılmıştır.



Şekil 3.8. Bir ışık kaynağı yardımı ile iğne ucunun numune yüzeyine temasının belirlenmesi

3.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi

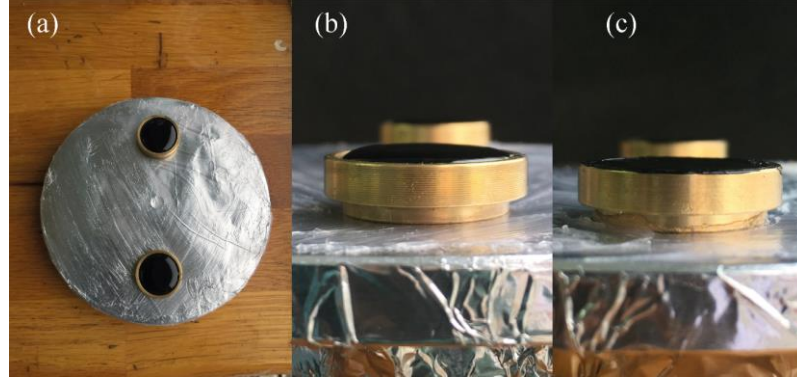
Yumuşama noktası deneyi, bitümüm kıvamlılığını belirlemede kullanılan bir başka deney yöntemidir (Hunter vd, 2015). Deney, TS EN 1427 (2015) veya ASTM D36-14 (2020) standartlarından herhangi biri esas alınarak yürütülebilmektedir. Deneyin prensibi özet olarak, sabit hızla ısıtılan bir sıvı içerisindeki bitümün üzerine yerleştirilen standart bir bilyenin, belirli bir mesafeyi kat ettiği andaki sıcaklığın belirlenmesidir. Bu esnada belirlenen sıcaklık değeri bitüm numunesinin yumuşama noktasını ifade eder. Bu değerin; yüksek olması bitüm numunesinin sert ve kıvamlılığının yüksek olduğunun, düşük olması ise bitüm numunesinin yumuşak ve kıvamlılığının düşük olduğunun bir göstergesidir. Yumuşama noktası deneyinde yüzük ve bilye içeren deney teçhizatı kullanılır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yumuşama noktası deney aparatı

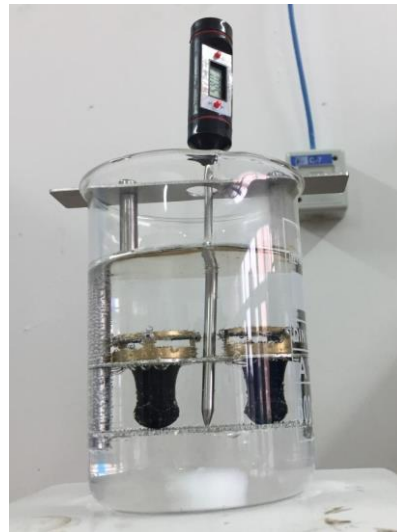
Deneyin Yapılışı:

Bitüm numunesi akıcı hale gelene kadar ısıtılır. Bu esnada halkalar ve yüzüklerin yerleştirileceği plaka, vazelin benzeri bir malzeme sürülerek kaygan hale getirilir. Malzemenin aşırı sürülmesinden kaçınılmalıdır aksi takdirde bitümün yapısını etkileyerek deney sonucunu değiştirebilmektedir. Bitüm numunesi akışkan hale geldikten sonra yüzüklerin içerisi bitüm ile doldurulur (Şekil 3.10 (a)) ve en az 30 dakika oda sıcaklığına kadar soğutulması beklenir. Oda sıcaklığına gelen numunenin yüzük üzerinden taşan kısımları sıcak bir spatula yardımıyla tıraşlanır (Şekil 3.10 (b) ve (c)).



Şekil 3.10. (a) bitüm doldurulmuş yüzükler (b) yüzükten taşan kısım (c) traşlama sonrası

Numune hazırlama işlemi tamamlandıktan sonra yüzükler deney aparatı içerisine yerleştirilir. Yüzüklerin üzerine bilyeler bırakılır ve bu aşamadan deneyin başlangıcına en hızlı şekilde geçilmeye özen gösterilir. 600 ml hacimli bir behere saf su doldurularak içerisine deney aparatı bırakılır. Isıtıcı tabla beher içerisindeki suyu dakikada 5°C ısıtacak şekilde ayarlanır ve beher tabla üzerine bırakılarak deney başlatılır. Zaman içerisinde sıcaklığın artmasıyla yüzük içinden geçen bilye, bitümün aşağı yönde akmasını sağlayacaktır. Bitüm kaplı bilyenin deney aparatının alt levhasına temas ettiği anda (Şekil 3.11) termometredeki sıcaklık okunur ve kaydedilir. İki bilyenin de temas ettiği andaki sıcaklık kaydedilir. Ancak, bu değerlerin birbirlerinden farkı en fazla 1°C olmalıdır. Aksi takdirde, deney iptal edilir ve yeniden numune alınarak tekrarlanır. Sıcaklık farkının 1°C 'den fazla olmadığı durumlarda, iki bilyenin temas ettiği sıcaklık değerlerinin ortalaması alınır ve bu değer bitüm numunesinin yumuşama noktasını ifade eder.



Şekil 3.11. Bitüm numunesinin alt levhaya temas ettiği an

3.2.3. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi

Düktilite deneyi bitümün bitüm numunesinin çekme davranışı hakkında bir bilgi sağlar. ASTM D113 (2017) standardı dikkate alınarak düktilite deneyi yürütülebilmektedir. Düktilite, standart bir briket içerisindeki bitüm numunesin iki tarafından, belirli bir sıcaklık ve çekme hızında, çekilirken kopmadan uzayabildiği cm cinsinden uzunluk değeri olarak tanımlanabilir (Oruc ve Yilmaz, 2016). Bitümün eğilme kapasitesi sahip olduğu düktiliteye bağlı olduğu için daha yüksek düktilite değerine sahip bitümlerin BSK'larda kullanımı daha faydalı olmaktadır. Düktilite deneyi genellikle 25°C sıcaklıkta ve 5 cm/dk çekme hızında yürütülür. Bu deneyin yapılmasında düktilite cihazından (Şekil 3.12) faydalanılmaktadır.

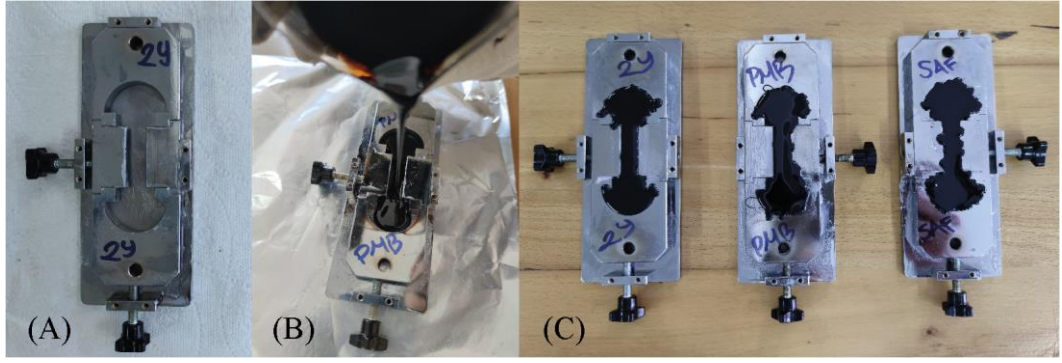


Şekil 3.12. Kuvvet ölçümlü düktilite cihazı

Deneyin Yapılışı:

Numuneler 135°C sıcaklığa ayarlanmış etüv içerisinde akışkan hale gelene kadar ısıtılır. Bu esnada numune kalıplarının hazırlanması işlemine başlanılır. Numune kalıplarının alt tabakası ve kalıbın orta kısmının bitüm ile temas halinde olan bölgeleri vazelin benzeri bir malzeme ile kaplanır. Böylece, bitümün bu kısımlara yapışması ve numunenin şeklinin bozulması engellenir. Kalıplar hazırlandıktan sonra akışkan hale gelen bitüm numunesi kalıpların içerisine kalıptan taşacak miktarda ve tek seferde dökülür (Şekil 3.13 (B)). Sıcak bitüm ile dolu olan numuneler 30-40 dakika süreyle oda sıcaklığında bekletilir ve soğuması sağlanır. Bu süre tamamlandıktan sonra kalıplar su banyosundan çıkarılır ve üst kısımları kâğıt havlu yardımıyla hafifçe kurulanır. Ardından, sıcak bir spatula yardımıyla numune tıraşlanarak bitüm numunesinin fazlalık kısımları atılır (Şekil 3.14 (B)). Tıraşlama işlemi tamamlandıktan sonra numune deney başlangıcından 85-95 dakika önce deney sıcaklığındaki su banyosuna yerleştirilir. Numune kalıbındaki

fazlalık parçalar kayma hareketleri ile numuneden ayrılır. Böylece, kalıp içindeki numune deneyin başlaması için hazır hale getirilmiş olur.

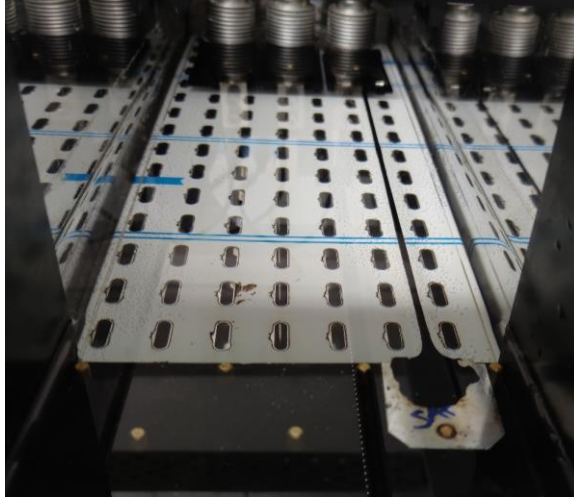


Şekil 3.13. (A) Düktilite kalıbı (B) düktilite kalıbına bitüm dökümü (C) bitüm ile doldurulmuş düktilite kalıpları



Şekil 3.14. (A) Tıraşlamadan önce kalıp yüzeyi (B) Tıraşlama işlemi (C) Tıraşlamadan sonra kalıp yüzeyi

Deneyin başlaması için numune cihazın su banyosu içerisindeki belirli bölgelere yerleştirilir. Ardından, 5 cm/dk'lık sabit çekme hızında çekme işlemine başlanır. Numunede kopma meydana geldiği anda iki tarafının birbirlerine olan uzaklığı cm cinsinden belirlenir. Bu değer numunenin düktilite değerini ifade eder. Bazı durumlarda numunenin, cihazın uzunluk ölçebilme kapasitesinden daha fazla uzadığı görülebilmektedir. Bu durum numunenin oldukça yüksek bir düktilite değerine sahip olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, eğer deney esnasında numunedeki kopma iki tarafının ortasına yakın bir yere denk gelmiyorsa veya numune su yüzeyine çıkmış ya da su banyosunun tabanına değiyorsa şartnamelerce deney geçersiz sayılmaktadır.



Şekil 3.15. Sabit hızdaki çekme kuvveti etkisi altında bitüm numunesi

3.2.4. Elastik Geri Kazanım Deneyi

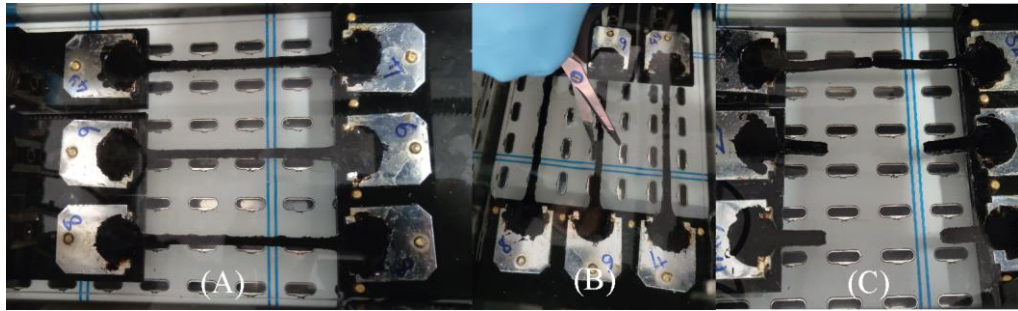
Elastik geri kazanım deneyi, bir bitüme eklenen polimerik bir malzemenin önemli bir elastomerik özellik sağlayıp sağlamadığını değerlendirmek için kullanılan yararlı bir yöntemdir (Hunter vd, 2015). Deneyin yapılmasında ASTM D6084 (2018) ve TS EN 13398 (2018) standartlarından faydalanılmaktadır. Deney prensibi özet olarak şu şekilde ifade edilebilir: Deney numunesi belirli bir sıcaklıkta (genellikle 10 veya 25°C) ve belirli bir hızda (5 cm/dk) belirli bir mesafeye kadar (10 cm) çekildikten sonra makas yardımıyla ikiye ayrılır ve belirli bir süre ardından şekil değiştirmedeki geri kazanım belirlenir. Burada belirlenen geri kazanım miktarı yüzde cinsinden bitüm numunesinin elastik geri kazanım değerini ifade eder ve bu değer ne kadar yüksek ise bitüm numunesinin elastiklik kabiliyetinin o kadar yüksek olduğu anlamına gelir. Elastik geri kazanım deneyinde de düktilite cihazı kullanılmaktadır (Şekil 3.12).

Deneyin Yapılışı:

Elastik geri kazanım deneyindeki numune hazırlama kısmı, düktilite deneyindeki numune hazırlama kısmına oldukça benzerdir. 135°C'ye ayarlanmış etüvde akışkan hale gelecek kadar ısıtılan bitüm numunesi elastik geri kazanım deneyi için kullanıma uygun numune kalıbı içerisine fazla miktarda dökülür. Bitüm döküldükten sonra 30-40 dk oda sıcaklığına gelmesi beklenir. Ardından 25°C deney sıcaklığındaki su banyosuna yerleştirilerek 25-35 dk bekletilir. Bu süre tamamlanınca numune su banyosundan dışarıya çıkartılır ve sıcak bir spatula yardımıyla numunenin fazlalık kısmı tıraşlanır. Deney başlangıcından 85-95 dakika önce, tıraşlanmış numuneler deney sıcaklığındaki su banyosuna yerleştirilir. Bu süre tamamlandıktan

sonra, numune kalıbındaki fazlalık parçalar dikkatlice numuneden ayrılır. Böylece, deney başlangıcı için numune hazır hale getirilmiş olur.

Hazır haldeki numuneler düktilite cihazındaki belirli kısımlara yerleştirilir. 25°C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde bulunan numune iki tarafından 5 cm/dk'lık sabit hızla çekilir. Numunenin uzama miktarı 10 ± 0.25 cm olduğunda çekme işlemi durdurulur (Şekil 3.16 (A)) ve hemen bir makas yardımıyla numune yaklaşık orta noktasından iki parçaya kesilir (Şekil 3.16 (B)). Bu işlemin ardından sabit koşullarda numune 60 dakika bekletilir ve şekil değiştirmenin geri dönmesine izin verilir. 60 dakikalık süre tamamlanınca düktilite cihazındaki numunenin hareket ettirilebilen kısmı numunenin sabit kısmına doğru yaklaştırılır. Bu noktada eğer numunenin kesilen parçalarında aşağı veya yukarı doğru bir şekil değişikliği meydana geldiyse el yardımıyla hafifçe düzeltme uygulanabilir. Numunenin iki ucunun birbirine tam temas ettiği anda cihazın hareketi durdurulur ve numunenin geri dönmeden sonra uzama miktarı belirlenir.



Şekil 3.16. (A) 10cm çekilmiş numuneler (B) makas yardımıyla numunelerin kesilmesi (C) 1 saatlik süre sonrasında numunelerin durumu

Deney tamamlandıktan sonra bir bitüm numunesine ait elastik geri kazanım değeri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Geri kazanım, \%} = \frac{E-X}{E} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada;

E: numunenin orijinal uzama miktarı, cm, ve

X: 60 dakikalık süre sonunda bitüm numunesinin iki ucunun birbirine temas ettiği haldeki uzama miktarıdır.

3.2.5. Yanma ve Parlama Noktası Deneyi

Bitüm gibi yanıcı malzemeler ile çalışıldığında yangın tehlikesini azaltmak ve gerekli güvenlik koşullarını sağlamak amacıyla çalışılan malzemenin yanma ve parlama noktalarının belirlenmesi gerekir. Deney numunesinin alev ile temas ettiği ve geçici olarak parladığı ve yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık parlama noktasını ifade eder. Deney numunesinin alev ile temas ettiği ve en az 5 saniye süre boyunca yanmaya devam ettiği en düşük sıcaklık ise yanma noktasını ifade eder. Bu değerlerin belirlenmesi için, ASTM D92 (2018), TS EN ISO 2592 (2017) standartları takip edilerek yürütülen, yanma ve parlama noktası deneyinden faydalanılır. Bitüm ile çalışılırken güvenliğin sağlanabilmesi için hiçbir şekilde bitüm parlama noktasının üzerine ısıtılmamalıdır. Bu deneyin yapım aşamasında Cleveland açık kabı kullanılır (Şekil 3.17).

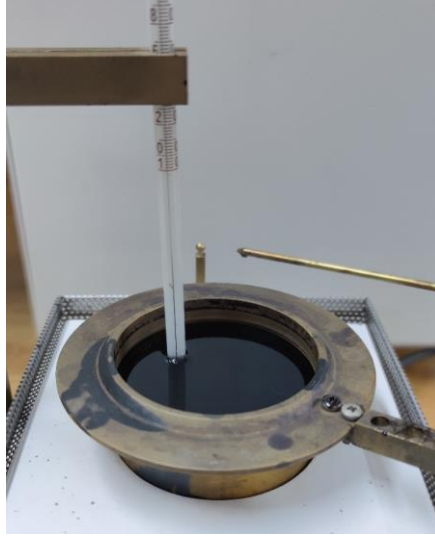


Şekil 3.17. Cleveland açık kabı

Deneyin Yapılışı:

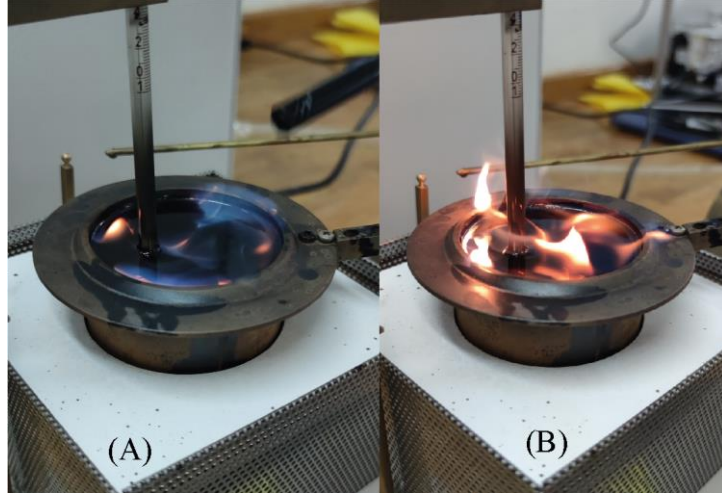
Başlangıç olarak bitüm numunesi akışkan hale gelene kadar ısıtılır ve deney kabına aktarılır. Ancak, bu aşamada bitüm numunesi ısıtılırken numunenin sıcaklığı beklenen parlama noktasının 56°C altındaki sıcaklık değerini aşmamalıdır. Numune deney kabında işaretli yere kadar doldurulur (Şekil 3.18). Bu seviyenin aşılmasına özen gösterilir. Ayrıca, numune doldurulduktan sonra yüzeyinde hava kabarcıkları olmamalıdır. Eğer hava kabarcıkları var ise bıçak benzeri bir alet yardımıyla kabarcıklar yok edilmeye çalışılır. Kabarcıkların giderilmesinin mümkün olmadığı durumlarda deney iptal edilir ve numune yeniden hazırlanır. Bununla birlikte, aktarılan

numunenin kaptaki sınır çizgisini aşması durumunda, fazlalık bitüm numune içerisinden dikkatlice alınarak seviye azaltılabilir. Numune aktarım işlemi sorunsuz bir şekilde tamamlandıktan sonra termometre numunenin içerisine daldırılır ve deney aletinde sabitlenir (Şekil 3.18). Burada termometrenin kabın tabanı ile temas halinde olmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.18. Sınır çizgisine kadar bitüm doldurulmuş deney seti

Numune ve termometre hazırlandıktan sonra cihaz ısıtılmaya başlanır. Numunenin beklenen parlama noktasının 56°C altından daha düşük sıcaklıklarda, dakikada $5-17^{\circ}\text{C}$ artış olacak şekilde sıcaklık arttırılabilir. Ancak, numunenin sıcaklığı beklenen parlama noktasının yaklaşık 56°C altına geldiğinde ısıtma hızı dakikada $5-6^{\circ}\text{C}$ olarak düzenlenir. Tahmin edilen parlama noktası değerine yaklaşık 28°C kaldıktan sonra numune sıcaklığındaki her 2°C 'lik artışı takiben numune yüzeyinden deney alevi geçirilir. Deney alevi geçirilirken tek bir geçişin 1 saniye sürmesi ve sürekli bir hareket dâhilinde gerçekleştirilmesine özen gösterilir. Numune üzerinde bir noktadan başlayıp numunenin tamamına yayılan ani bir alevlenme görüldüğünde termometredeki sıcaklık değeri kontrol edilir ve bu değer numunenin parlama noktası olarak kaydedilir. Ancak, deney alevi geçirilmesi esnasında numune yüzünde bölgesel mavi parlamalar görülebilir bunlar parlama noktası ile karıştırılmamalıdır. Parlama noktası belirlendikten sonra numune ısıtılmaya ve yine her 2°C 'lik artışla birlikte numunenin yüzeyinden alev geçirilmeye devam edilir. Numune yüzeyinde oluşan alevin en az 5 saniye süreyle yanmaya devam ettiği sıcaklık termometreden belirlenir ve numunenin yanma noktası olarak kaydedilir.



Şekil 3.19. (A) Parlamanın meydana geldiği an (B) Yanmanın başladığı an

3.2.6. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi

Bitüm trikloretilen içerisinde tamamen çözünebilir bir malzemedir. Bitümün içerisinde yabancı bir maddenin olup olmadığını belirlemek amacıyla trikloretilende çözünürlük deneyi yapılabilir. Ayrıca, bitümün trikloretilen içerisinde çözünen kısmı BSK'da aktif olarak bağlayıcı görevini üstlenecek kısmı temsil etmektedir. Trikloretilende çözünürlük deneyi TS EN 12592 (2015) ve ASTM D2042 (2015) standartlarından biri dikkat alınarak yürütülebilir. Deney için filtre kâğıdı, erlenmeyer, beher, vakum pompası ve trikloretilen gibi çeşitli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Trikloretilende çözünürlük deneyi için kullanılan teçhizat

Deneyin Yapılışı:

Darası alınmış bir beher içerisinde akışkan hale gelene kadar ısıtılmış bitüm numunesinden 2 gr aktarılır. Numunenin oda sıcaklığına gelmesi beklenir ve 1 mg hassasiyetle tartılarak elde edilen değer B olarak kaydedilir. Aynı bir beher içerisinde

100 mL trikloretilen dökülür. Ardından 100 mL trikloretilenin tamamı 2 gr bitüm dolu kabın içerisine boşaltılır. Bitüm ve trikloretilen dolu beher biraz karıştırıldıktan sonra en az 15 dk bir kenarda bekletilir.

Beher kenarda bekletilirken filtre kâğıdı ve onu tutan kap birlikte tartılır ve bu değer A olarak kaydedilir. Erlenmeyerin üzerine filtre kâğıdı ve kabı birlikte yerleştirilir. Hava vakum pompası alttaki kabın üst kısmındaki çıkışa bağlanır. Bunu takiben, bekleme süresini tamamlamış trikloretilen ve bitüm dolu kabın içerisindeki sıvı filtreden geçirilerek erlenmeyerin içerisine tamamen boşaltılır. Boşaltma işlemi başladıktan bir süre sonra vakum pompası orta seviyede çalıştırılarak filtreleme işinin hızlanması sağlanır. Sıvının tamamı filtre kâğıdında geçmesine rağmen filtre kâğıdının rengi koyu bir şekilde kalır. Bu sebeple filtre kâğıdından geçebilecek tüm parçacıkların geçirilmesi amacıyla filtre kâğıdı trikloretilen ile yıkanmaya devam edilir. Filtre kâğıdının rengi beyaza en yakın halini alınca yıkama işlemi durdurulur. Ardından, filtre kâğıdı ve onu tutan kap erlenmeyer üzerinden alınarak bir kenarda 30 dakikalığına hava ile kurumaya bırakılır. 30 dk tamamlandıktan sonra 100-110°C sıcaklığındaki etüve 1 saatliğine yerleştirilerek filtre kâğıdı ve kabın üzerinde kalan trikloretilenin tamamen buharlaştırılması sağlanır. Bu sürenin sonunda dışarıda en az 20 dakika soğuması sağlanır. Ardından, filtre kâğıdı ve kabı üzerinde kalan çözünmemiş bitüm ile birlikte tartılır ve bu değer C olarak kaydedilir. A, B ve C ölçümleri hatasız bir şekilde yapıldıktan sonra deney tamamlanmış olur. Deney sonrasında aşağıdaki formüller yardımıyla bitüm numunesinin yüzde cinsinden trikloretilende çözünürlüğü hesaplanır:

$$\% \text{ Çözünmeyen} = \left(\frac{C-A}{B} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

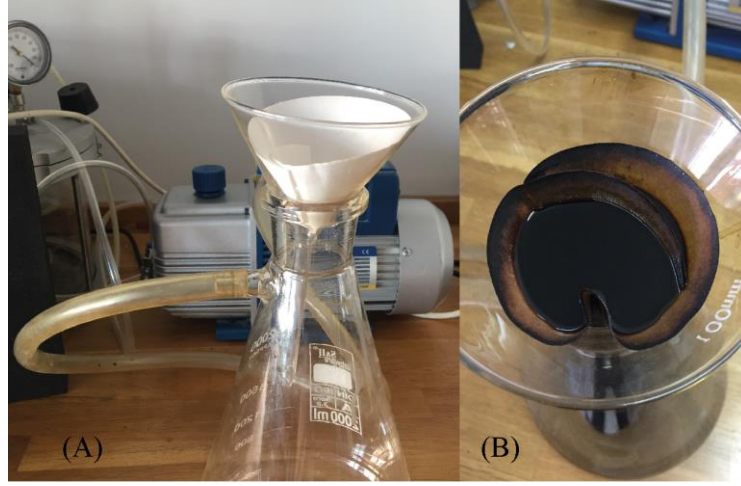
$$\% \text{ Çözünen} = \left(\frac{B-(C-A)}{B} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

burada,

A: filtre kağıdı ve kabının ağırlığı

B: bitüm numunesinin ağırlığı, ve

C: çözünmeyen kısım ile birlikte filtre kağıdı ve kabının ağırlığıdır.



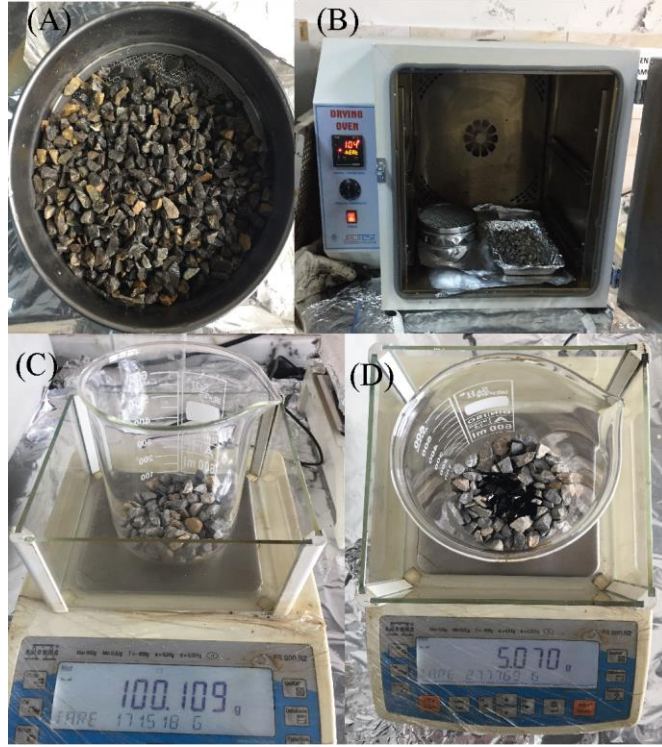
Şekil 3.21. (A) Düzeneğe yerleştirilmiş filtre kâğıdı (B) Filtre kâğıdı üzerinde vakum cihazı yardımıyla süzdürülen bitüm ve trikloretilen karışımı

3.2.7. Nicholson Soyulma Deneyi

Su ve trafik etkisiyle BSK içerisindeki bitümün agrega ile adezyonu zayıflar ve bu durum zamanla agrega üzerinden bitümün soyulmasına sebep olur. Bu olaya bitümün gösterdiği direnç soyulma dayanımı olarak adlandırılır ve soyulma dayanımı bitüm ile agreganın yapışma özelliğinin bir ölçüsüdür. Bitüm numunelerinin agregaya yapışma özelliğini tayin etmek için ise, TS EN 12697-11 (2020) şartnamesi esas alınarak yürütülen, Nicholson soyulma deneyinden faydalanılabilir. Bu deneyin prensibi genel olarak; belirli miktarda bitüm numunesinin, belirli boyut ve miktardaki agrega ile karıştırılıp çeşitli koşullandırmalara maruz bırakıldıktan sonra görsel olarak bitüm kaplı agrega yüzeyinin tüm agrega yüzey alanına oranlanmasıdır. Deneyin yürütülebilmesi için petri kabı, baget, 9.5 – 4.75 mm elek aralığında agrega ve beher gereklidir.

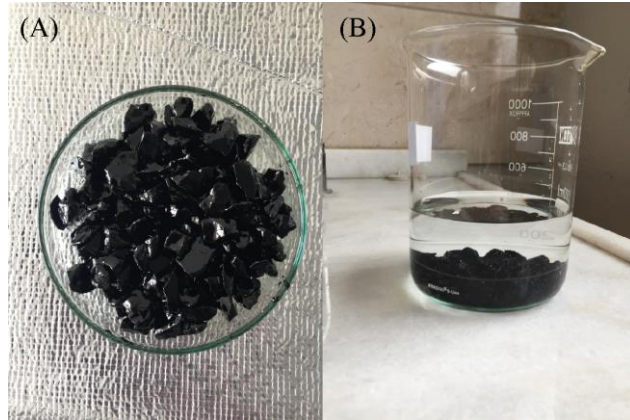
Deneyin Yapılışı:

Öncelikle agregalar elenir ve 9.5 – 4.75 mm'lik elekler arasında kalan agregalardan 100 gr alınır. Alınan agregalar yıkanır ve ardından 110°C'lik etüvde kurutulur. Böylece, agregalar deneyde kullanıma hazır hale getirilmiş olur. Bir beher içerisine 100 gr agrega koyulur ve 150°C sıcaklıkta etüvde 1 saat süreyle bekletilir. Etüv içerisinde bir saat beklemiş olan 100 gr agreganın üzerine 5 gr bitüm dökülür ve bitüm homojen bir şekilde agregaların yüzeyini kaplayana kadar bir baget yardımı ile karıştırılır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra içerisinde bitüm ve agreganın bulunduğu beher 60°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilir ve burada 24 saat süreyle bekletilir.



Şekil 3.22. (A) 9.5 – 4.75 mm’lik elekler arasında kalan yıkanmış agrega (B) agregaların etüve kurutulması (C) agregalardan yaklaşık 100 gr alınması (D) 100 gr agregaya yaklaşık 5 gr bitüm ilavesi

Koşullandırma süresi tamamlandıktan sonra beher içerisindeki bitüm kaplı agregalar 10 cm çapa sahip petri kaplarına aktarılır. Petri kaplarına saf su ilave edilerek kapakları kapatılır ve 60°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilir. Burada, 24 saat petri kabı bekletilir. Bu sürenin sonunda petri kabının içerisindeki su boşaltılarak yeniden doldurulur. Ardından su ve bitüm kaplı agrega dolu petri kabının yanlarından ışık tutularak agrega yüzeylerinin yüzde kaç oranında bitüm ile kaplı olduğu belirlenmeye çalışılır. Böylece, deney tamamlanmış ve gerekli sonuçlar elde edilmiş olur.



Şekil 3.23. (A) Petri kabına aktarılmış bitüm ve agrega karışımı (B) Koşullandırmaya hazır hale getirilmiş numune

3.2.8. Özgül Ağırlık Deneyi

Bitümlerin özgül ağırlığı BSK tasarımlarında önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple kaplamada kullanılacak olan bitümün özgül ağırlığı mutlaka bilinmelidir. Bitümün özgül ağırlığı, TS EN 15326+A1 (2010) veya ASTM D70 (2021) standartlarından biri dikkate alınarak yürütülebilen özgül ağırlık deneyi ile belirlenebilir. Bitüme katkı maddesi ilavesinin saf bitümün özgül ağırlığında herhangi bir değişim meydana getirip getirmediği de ayrı ayrı hazırlanan numunelere bu deneyin uygulanması ile belirlenebilir. Bu deneyin yürütülebilmesi için; piknometreye, saf suya, su banyosuna, termometreye, 0.001 g hassasiyet ile ölçüm yapabilen bir hassas teraziye ve 600 ml hacimli behere ihtiyaç duyulmaktadır.

Deneye, deney aparatlarını hazırlayarak başlanılır. Öncelikle 600 ml'lik beher saf su ile doldurulur. Beher içindeki saf suyun üst seviyesinin, beher içerisine piknometre yerleştirildiğinde bu piknometrenin üst seviyesinden en az 4 cm yukarıda olması sağlanmalıdır. Saf su dolu beher deney sıcaklığındaki (15.6°C veya 25°C) su banyosuna yerleştirilir. Su banyosunun su seviyesi banyo içerisindeki suyun, beher içerisindeki saf suya karışmaması için düşük tutulmalıdır. Bununla birlikte, bu su seviyesi en az 10 cm olmalıdır.



Şekil 3.24. Su banyosuna yerleştirilmiş saf su dolu piknometreler

Beher su banyosuna yerleştirildikten sonra, ilk olarak tamamen temizlenmiş bir piknometrenin boş haldeki ağırlığı 0.001 gr hassasiyetle tartılır ve bu değer A olarak kaydedilir. Piknometre içerisini tamamen dolduracak miktarda piknometreye saf su dökülür. Bu piknometre, kapağı tam kapatılmadan, deney sıcaklığındaki su banyosu içerisine yerleştirilir ve kapağı tamamen sıkıştırılır. Su banyosu içerisindeki

piknometre sabit sıcaklıkta en az 30 dk bekletilir. Bu sürenin ardından piknometre beherin içerisinden alınır. Hızlı bir şekilde piknometrenin kapağı temiz, bir kâğıt havlu ile tek ve hafif bir dokunuşla kurulandıktan sonra piknometrenin etrafı hızlıca temizlenir. Bunu takiben tamamı su dolu piknometre 0.001 gr hassasiyetle tartılır ve bu değer B olarak kaydedilir.

A ve B değerleri kaydedildikten sonra bitüm numunesini hazırlama aşamasına geçilir. Bu aşamada öncelikle, bitüm numunesi yumuşama noktası değerinin 110°C fazlasından büyük derecelere ısıtılmaması ve ısıtma süresinin 2 saatten fazla olmaması koşulları ile akışkan hale gelene kadar ısıtılır. Akışkan haldeki bitüm, kurutulmuş, temizlenmiş ve ısıtılmış bir piknometreye, piknometrenin dörtte üçünü dolduracak kadar doldurulur. Bitüm dökülürken piknometrenin kenarlarına temas etmesi engellenmeye çalışılır. Bitüm numunesi piknometreye doldurulduktan sonra, bitüm dolu piknometrenin oda sıcaklığına soğuması için en az 40 dk beklenilir. Ardından, yaklaşık dörtte üçü bitüm dolu olan piknometre 0.001 gr hassasiyetle tartılır ve bu değer C olarak kaydedilir. C değerinin de belirlenmesiyle birlikte deneyin son aşamasına gelinir. Bu aşamada dörtte üçü bitüm dolu piknometre tamamen dolana kadar saf su ilave edilir. Piknometrenin kapağı gevşek şekilde kapatılarak su banyosundaki saf su dolu beherin içerisine yerleştirilir ve burada kapağı sıkıca kapatılır. Saf su ve bitüm dolu piknometre su banyosundaki beher içerisinde en az 30 dk bekletilir. Bu süre dolduktan sonra, daha önce yapılan şekilde saf su ve bitüm dolu piknometre kâğıt havlu ile kurutulur ve tartılır. Ardından, bu değer D olarak kaydedilir. A, B, C ve D değerleri belirlendikten sonra aşağıdaki formül yardımıyla bitüm numunesinin özgül ağırlığı hesaplanır:

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.4)$$

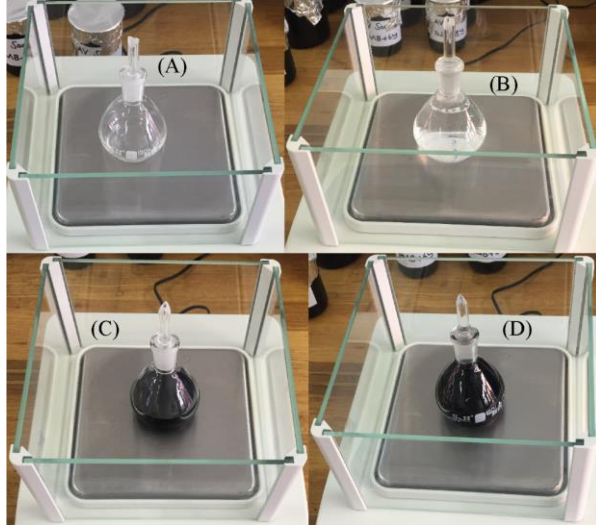
burada,

A: piknometrenin ağırlığı (kapak dahil)

B: saf su dolu piknometrenin ağırlığı

C: yaklaşık dörtte üçü bitüm dolu piknometrenin ağırlığı, ve

D: bitüm ve saf su dolu piknometrenin ağırlığıdır.



Şekil 3.25. (A) Kapak dâhil piknometre, (B) saf su dolu piknometre, (C) yarısı bitüm dolu piknometre, (D) bitüm ve saf su dolu piknometre

3.3. Modifiyeli Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

3.3.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO) Deneyi

Bitüm üretiminden itibaren çeşitli sıcaklık, hava ve basınç etkilerine maruz kalır. Bu etkiler sonucunda bünyesinde bir takım değişiklikler meydana gelir ve bu değişiklikler en genel tabirle bitümün yaşlanması olarak ifade edilir. Superpave şartnamesine göre bitümün hizmet ömründe üç kritik dönem mevcuttur (McGennis vd, 1994):

- Taşınma, depolanma ve işlenme aşaması
- Sıcak karışım üretimi ve kaplama inşası
- Kaplama içerisinde geçirdiği uzun dönem sonrası

Deneylere tabi tutulan tüm saf bitümler temin edildiklerinde ilk kritik aşamayı atlattımlardır. Ancak, saf bitüm numuneleri kullanılarak yapılan deneyler, bitümün, kaplama inşa edildiği andaki performansını, tam anlamıyla, temsil etmekte eksik kalmaktadır. Bu sebeple, bitüm numunelerinin kaplama inşa edildikten hemen sonraki performanslarını belirlemek amacıyla numuneler deneylerden önce yapay yöntemlerle yaşlandırılırlar. Bu yaşlanma bitümün ömründeki ikinci kritik aşamayı temsil eder ve kısa dönemli yaşlanma olarak adlandırılır. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFO) deneyi de bitümün kısa dönemli yaşlanmasını temsil eden bir deneydir. Ayrıca bu deneyle, kütle kaybı hesabı yaparak bitüm numunesinin kısa dönemli yaşlanmadan etkilenme miktarını belirlemek de mümkündür. Kütle kaybı az olan bitüm numunesinin kısa dönemli yaşlanmadan fazla etkilenmediği düşünülür. TS EN 12607-

1 (2015) veya ASTM D2872 (2019) standartlarından herhangi biri takip edilerek yürütülebilen RTFO deneyinin temel prensibi, dönel film halindeki bitüm numunesinin 85 dakika süreyle 163°C sıcaklıktaki bir etüvde hava ve ısının etkisiyle yaşlandırılmasıdır. Bu deneyin yürütülebilmesi için, deney için özel üretilen etüve, cam RTFO kaplarına ve hassas bir teraziye ihtiyaç vardır.



Şekil 3.26. Dönel ince film halinde ısıtma fırınının dıştan ve içten görünümü

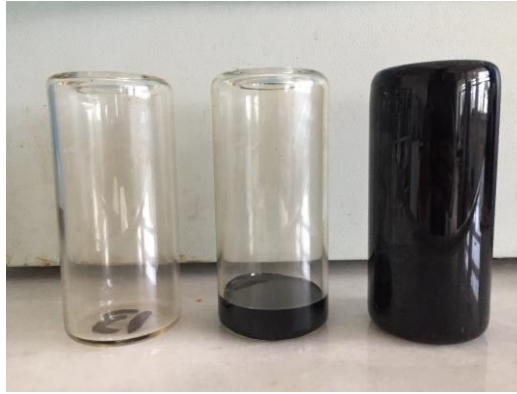
Deneyin yapılışı:

Deneye başlanmadan önce RTFO fırını çalıştırılır ve deney sıcaklığı olan 163°C'ye ayarlanır. Fırın ısısı dengelenirken diğer işlemler yürütülür. İçi boş, cam RTFO kaplarının ağırlıkları 0.001 gr hassasiyetle ölçülür ve kaydedilir. Ardından, bitüm numunesi akışkan hale gelene kadar etüv içerisinde ısıtılır. Ancak, etüv ısısı hiçbir zaman 163°C'nin üzerinde olmamalıdır. Akışkan hale gelen bitüm numunesinden 35±0.5 gr cam RTFO kabına aktarılır. Bitüm kabın içerisine yerleştirildikten hemen sonra kap yan yatırılır ve dikey eksen etrafında bir tur döndürülerek içerisindeki bitümün kabın yan yüzeylerine yayılması sağlanır. Bu aşamada, bitümün kaptan dışarıya taşmamasına özen gösterilmelidir. Bu işlemden sonra, hazırlanmış olan kap 60-180 dakika süreyle soğumaya bırakılır.

RTFO deney fırını içerisinde dönme hareketi yapabilen ve içerisine cam RTFO kaplarının yerleştirildiği bir tabla bulunur. Bu tabla en fazla 8 adet kap taşıyabilmektedir. Deney öncesinde gerekli numune sayısı belirlenmeli ve gerekli sayıda kap bitümle doldurulmalıdır. Gerekli sayı sekizden az olsa bile boş kaplar tabla üzerindeki yerlerine yerleştirilmelidir. Bununla birlikte, kütle kaybının belirlenmesi için aynı numunenden en az iki kap doldurulması gerekmektedir. Gerekli sayıda bitüm dolu cam RTFO kapları, soğutma süresi tamamlandıktan sonra, fırın içerisindeki dikey tablaya yerleştirilir. Tüm RTFO kapları fırına yerleştirildikten sonra fırının kapağı

kapatılır. Ardından fırının içerisindeki hava üfleme sistemi 4000±200 mL/dk hava akışı sağlayacak şekilde ayarlanır. Ayrıca, kapları taşıyan tablanın da 15±0.2 dev/dk hızla dönme hareketi başlatılır ve gerekli koşullar sağlandıktan sonra 85 dakika süreyle numuneler fırın içerisinde bekletilir. Bununla birlikte, fırın kapağı kapatıldıktan sonra fırının sıcaklığının, deney sıcaklığına tekrar ulaşması en fazla 10 dakika sürmelidir. Aksi takdirde, deney iptal edilir. Bu sürenin sonunda, kütle kaybını belirlemede kullanılacak RTFO kapları 60-180 dakika soğumaya bırakılır ve ardından 0.001 gr hassasiyetle tartılarak kütleleri belirlenir. Diğer yandan, kütle kayıplarının belirlenmeyeceği, sadece deneye tabi tutulacak numuneler ise hemen başka bir kaba akıtılır. Bununla birlikte, tabladan ilk kap alınması ile son kap alınması arasında geçen süre en fazla 5 dakika olmalıdır. Tüm bu aşamalar tamamlandıktan sonra kütle kaybının belirlenmesinde aşağıdaki formül kullanılır:

$$\%, \text{ kütle kaybı} = \frac{\text{orjinal kütle} - \text{yaşlanmış kütle}}{\text{orjinal kütle}} \times 100 \quad (3.5)$$



Şekil 3.27. Sırasıyla; boş, 35 gr bitüm dolu ve deney sonrası RTFO kapları

3.3.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Bitüm bir önceki alt başlıkta belirttiği gibi ömrü boyunca üç kritik aşamadan geçer. İlk iki aşamayı geçirip kaplamada yerini alan bitüm uzun dönem çevre ve trafik etkisine maruz kalınca üçüncü kritik aşamayı da geçirmiş olur. Bu yaşlanma türüne uzun dönem yaşlanma adı verilir. Saha koşullarında uzun yıllar alan bu yaşlanma süreci laboratuvar ortamında PAV deneyi ile temsil edilir. ASTM D6521 (2019) veya TS EN 14769 (2012) standartlarından herhangi biri esas alınarak yürütülebilen PAV deneyinin yapılabilmesi için PAV deney aletine ve ince film halinde ısıtma deneyinde kullanılan metal numune kaplarına ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, bu deneyde kullanılacak numunelerin öncelikle RTFO deneyine tabi tutulması gerekmektedir.

PAV deneyinin temel prensibi, belirli bir deney sıcaklığında (90, 100 veya 110°C) ve 2.10 MPa hava basıncı altında 20 saat süreyle bitüm numunelerinin yaşlandırılmasıdır. Bu deney, sonrasında elde edilen numuneler kaplama içerisinde uzun dönem (5-10 yıl) hizmet vermiş bitümü temsil ederler.



Şekil 3.28. (A) PAV cihazı, (B) Vakum fırını

Deneyin Yapılışı:

RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numuneler bir kaba aktarılarak oda sıcaklığına kadar soğutulur ve başka bir gün PAV deneyine tabi tutulmak için saklanır. Deney başlangıcında, PAV kaplarının dizildiği kap rafı, PAV içerisine yerleştirilerek deney sıcaklığında (100°C) ön ısıtmaya tabi tutulur. PAV kabı bir hassas terazi üzerine yerleştirilir ve akışkan hale gelene kadar ısıtılmış kısa dönemli yaşlandırılmış bitüm numunesinden 50 ± 0.5 gr tartılarak PAV kabına dökülür. Bitüm ile doldurulan PAV kapları, kap rafına yerleştirilir. Ardından, kap rafı dikkatlice PAV deney aletine bırakılır. Deney aletinin kapağı üzerindeki cıvatalar yardımıyla sıkıca kapatılır. Ardından, içerisindeki sıcaklık kontrol edilir ve sıcaklık deney sıcaklığına 20°C yaklaştığında basınçlı hava vanası açılarak deney aleti içerisine 2.1 ± 0.1 MPa basınç verilir. Deney süresi bu aşamadan sonra başlar. Bitüm dolu PAV kapları, deney aleti içerisinde 20 saat (± 10 dk) süreyle bekletilir. 20 saatlik süre sonunda PAV'ın iç basıncı boşaltma vanası yardımıyla yavaşça azaltılır. Basınç düşüş hızı, PAV'ın içindeki basıncın dış basınç ile dengelenmesi 9 ± 1 dk sürecek şekilde, gerekirse zaman zaman vana açıklığı değiştirilerek, ayarlanmalıdır. Bu aşamanın dikkatli yürütülmesi, numune üzerindeki hava kabarcıklarının fazla olmasını engellemede yardımcı olmaktadır. Ayrıca, bu süre deney süresine dâhil değildir.

Yukarıda belirtilen aşamalar tamamlandıktan sonra, PAV içerisindeki kap rafı ile birlikte PAV kapları çıkartılır ve PAV kapları daha önceden 163°C 'ye ayarlanmış bir etüv içerisinde 15 ± 1 dakikalığına yerleştirilir. Bu süre içerisinde vakum fırını açılarak $170\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanır ve ön ısınması sağlanır. Etüv içerisindeki numuneler akışkan hale gelene kadar ısıtılır ve hava kabarcıklarının giderilmesine yardım etmek amacıyla hafifçe karıştırılır. Ardından, etüvden çıkarılan numuneler bir kaba aktarılır ve bu kap 1 dakika içerisinde vakum fırınına yerleştirilir. Burada, kap seçilirken, dökülen numunenin 15-40 mm aralığında bir yüksekliğe sahip olması dikkate alınır. Vakum fırını içerisindeki kap vakum uygulanmadan 10 ± 1 dk bekletilir. Bu süre tamamlandıktan sonra, vakum fırını içerisindeki basınç, mutlak 15 ± 2.5 kPa olacak şekilde vana yardımıyla düşürülür. Kap, bu sabit koşullar altında vakum fırını içerisinde 30 ± 1 dk bekletilir. Bu sürenin sonunda, kap vakum fırınından çıkartılır ve eğer üzerinde hava kabarcıkları kalmış ise sıcak bir bıçak yardımıyla bu kabarcıklar giderilir. Anlatılan tüm aşamaların ardından, bitüm numunesinin uzun dönem yaşlanmış halindeki özelliklerine sahip olduğu kabul edilen kalıntı numuneleri elde edilmiş olur.



Şekil 3.29. (A) RTFO kaplarından PAV kaplarına numune aktarımı (B) PAV kaplarının numune rafına yerleştirilmesi (C) numune rafının PAV cihazına yerleştirilmesi (D) PAV sonrası numunelerin farklı kaplara aktarılması (E) Numunelerin vakum fırınına yerleştirilmesi (F) Vakum fırınında numunelerde kalan hava boşluklarının giderilmesi

3.3.3. Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Bitümler kullanıldıklarında belirli bir işlenebilirliğe sahip olmak zorundadırlar. Aksi takdirde, bitüm malzemesinin pompalanması, karıştırılması ve sıkıştırılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, bitümün inşaat sahasına tesliminden evvel yeterli işlenebilirliğe sahip olduğundan emin olmak gerekir. Bu amaç doğrultusunda, yaşlanmamış bitümlerin akma özelliklerinin belirlenmesinde dönel viskozite deneyinden faydalanılmaktadır. Bu deney, ASTM D4402 (2015) veya TS EN 13302 (2018) standartlarından herhangi biri dikkate alınarak bir dönel viskozimetre (RV) cihazı yardımıyla yürütülmektedir. RV cihazının yanında ayrıca RV haznesinin içerisindeki sıcaklığı ayarlamaya ve sabit tutmaya yarayan bir termosel bulunmalıdır. Brookfield DV2T model viskozimetre cihazı bu deneyin yürütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu çalışma kapsamında da bu cihazdan faydalanılmıştır.



Şekil 3.30. RV cihazı ve termosel

RV deneyinin temel prensibi, yüksek sıcaklıktaki bitüm numunesine belirli bir geometrideki milin daldırılıp sabit hızda döndürülmesi için gerekli olan torkun ölçülmesidir. Buradaki tork bitüm numunesinin, milin dönme hareketinin oluşturduğu akma karşı gösterdiği direnci, başka bir ifadeyle, viskozitesini temsil eder. RV cihazında, belirlenen tork ve dönme hızı yardımıyla, Pascal saniye ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) veya yüzdepoise (*centipoise*, cP) cinsinden bitüm numunesinin deney sıcaklığındaki viskozitesi belirlenir. Burada, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 'nin 1000 cP 'ye eşit olduğunu ifade etmekte fayda vardır. Superpave şartnamesine göre eğer bir bitüm numunesinin 135°C sıcaklıktaki viskozitesi $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 'den küçük ise işlenebilirliğinin yeterli olduğunu kabul edilir.

Bununla birlikte, yine aynı şartnameye göre, eğer bitümü üreten firma şartname sınırını sağlamayan bir bitümün işlenebilir olduğunun güvencesini verebiliyorsa şartnamenin bu sınırı es geçilebilmektedir (McGennis vd, 1994).

Deneyin Yapılışı:

RV deneyinde kullanılan numune kabı bir hassas terazi üzerine yerleştirilir. Akışkan hale gelene kadar ısıtılmış bitüm numunesinden RV kabına 8 ± 0.1 gr aktarılır. Ardından, RV cihazı açılır ve cihazın elektrik aksamının ısınması için işlem yapılmadan yaklaşık 5 dakika beklenir. Ardından sıcaklık kontrolünü sağlayan termosel üzerinde deneyin yürütüleceği sıcaklık ayarlanır. Numune deney sıcaklığına gelene kadar mil hazırlanır ve yerine takılır. RV cihazına bağlanabilen farklı boyutlu miller mevcuttur ve genellikle, No.21 ve No.27 milleri kullanılmaktadır. Burada mil seçilirken dikkat edilen husus; dönme hareketi esnasında cihazdaki tork değerinin %10 ile %98 aralığında kalmasıdır. Eğer tork, bu aralıktan küçük ise belirlenen deney sıcaklığında bitüm numunesinin viskozitesinin çok düşük olduğu anlamına gelir. Eğer tork, belirtilen aralıktan yüksek ise öncelikle kullanılan mil boyut olarak bir küçüğü (numara olarak büyüğü) ile değiştirilir. Ancak, halen tork, belirtilen aralıktan yüksek ise cihazın arızalanmaması amacıyla deney iptal edilir. Çünkü bu durum belirlenen deney sıcaklığında numunenin viskozitesinin çok yüksek olduğu anlamına gelir.



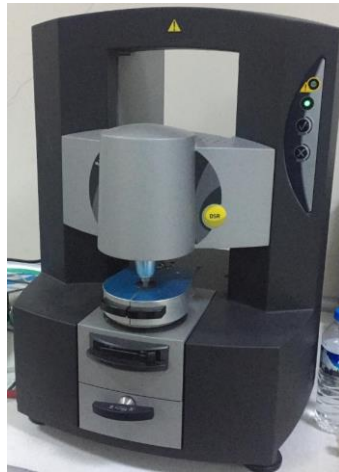
Şekil 3.31. RV tüplerine bitüm doldurma işlemi

Numune deney sıcaklığına geldikten sonra (bu süre en fazla 30 dk olmalı), mil numune içerişine, ölçümde kullanılacak kısmı tamamen numunenin içinden kalacak şekilde, daldırılır. Milin dönme hareketi başlatılmadan önce sıcaklığın dengelenmesi için en az 10 dk beklenmelidir. Bu süre tamamlandıktan sonra, RV motoru çalıştırılarak milin 20 dev/dk sabit hızdaki dönme hareketi başlatılır. Dönme

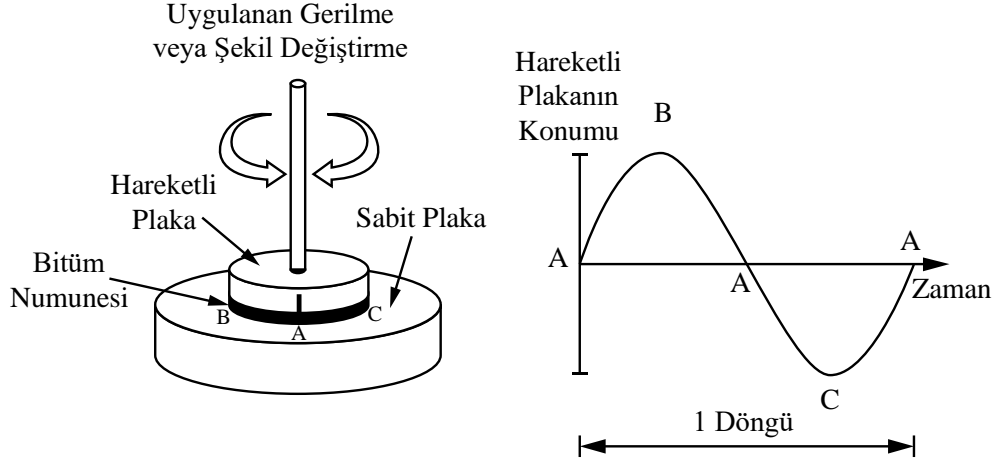
hareketinin dengelenmesi adına, ilaveten 5 dk daha beklenir. Bu süre tamamlandıktan sonra, RV cihazından 1 dk'lık aralıklarla üç farklı viskozite okuması yapılır. Bu üç değerın ortalaması numunenin belirli bir deney sıcaklığındaki viskozitesini temsil eder. Buna ilaveten, farklı deney sıcaklıklarında deney tekrarlanabilir. Numune kaptan çıkarılmadan termoseldeki sıcaklık artırılarak önceki aşamalar tekrarlanır ve numunenin farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri kaydedilir.

3.3.4. Dinamik Kayme Reometresi (DSR) Deneyi

Bitümlerin yüksek ve orta sıcaklıklardaki reolojik özelliklerinin tespit edilmesinde en yaygın kullanılan yöntem, daha önce de belirtildiği üzere, DSR deneyidir. DSR deneyi, DSR cihazında (Şekil 3.32), TS EN 14770 (2012) veya ASTM D7175 (2015) standartlarından herhangi biri dikkate alınarak yürütülebilmektedir. Bununla birlikte piyasada iki farklı DSR cihazı mevcuttur: sabit gerilmeli ve sabit şekil değiştirmeli. Sabit gerilmeli DSR cihazları bitüm numunesine sabit bir gerilme uygular ve bu gerilme sonucunda numunede belirlenen şekil değiştirmeleri kaydederler. Sabit şekil değiştirmeli DSR cihazları ise bitüm numunesini belirli bir şekil değiştirmeye maruz bırakırlar ve bu esnada numunede meydana gelen gerilmeyi ölçerler. Bu deneyin temel prensibi, birbirine paralel iki plaka arasına yerleştirilmiş bitümün salınım hareketlerine maruz bırakılarak G^* ve δ değerlerinin belirlenmesidir. Paralel plakalar ve hareketli plakanın yaptığı hareket Şekil 3.33'te temsili olarak gösterilmiştir. Hareketli plakanın hareketi A noktasından başlar, B noktasına doğru devam eder. Ardından, B noktasından C noktasında doğru bir geri dönüş olur ve C noktasından sonra tekrar A noktasına gelindiğinde salınım hareketinin bir döngüsü tamamlanmış olur.



Şekil 3.32. DSR cihazı



Şekil 3.33. DSR cihazının plakaları ve bir salınım döngüsü

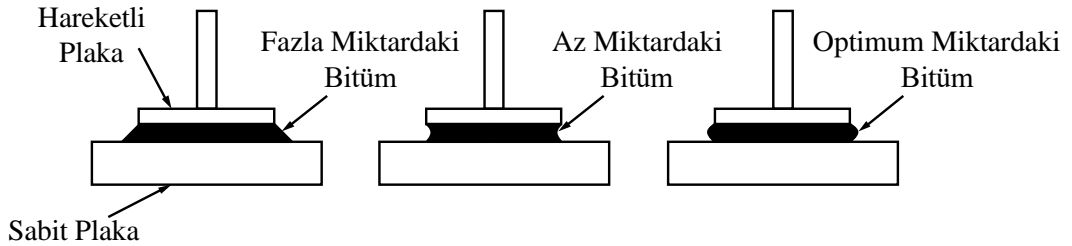
Salınım hareketinin frekansı basitçe bir döngünün tamamlanması için gereken süre olarak ifade edilir. Bu değer hertz cinsinden ifade edilecek olursa, bir saniye içerisindeki toplam döngü sayısının belirlenmesi gerekir. Salınımın frekansını tanımlamanın bir diğer şekli ise hareketli plakanın kat ettiği dairesel mesafeyi belirlemektir. Dairesel mesafe radyan olarak ifade edilir ve 1 radyan yaklaşık olarak 57 dereceye denk gelmektedir. Bu durumda, salınım hareketinin frekansı saniyedeki radyan cinsinden ifade edilir. DSR cihazı farklı frekanslarda çalışma kapasitesine sahiptir. Ancak, Superpave şartnamesine göre frekans değerinin 10 rad/sn olması gerekmektedir. Başka bir ifade ile salınım hareketinin frekansı yaklaşık 1.59 Hz olmalıdır (McGennis vd, 1994).

DSR deneyinde bitüm numunesinin, yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izine karşı direncini $G^*/\sin\delta$ değeri temsil ederken orta sıcaklıklardaki yorulma dayanımını $G^*.\sin\delta$ değeri ifade etmektedir. Şartnamelerde bu değerler vasıtası ile bitümün performansının belirlenmesin daha uygun olduğu düşünülmüştür. Superpave şartnamesine göre belirli bir sıcaklıkta; yaşlandırılmamış bir bitüm numunesinin $G^*/\sin\delta$ değeri en az 1.0 kPa, RTFO ile yaşlandırılmış bir bitüm numunesinin $G^*/\sin\delta$ değeri en az 2.2 kPa ve PAV ile yaşlandırılmış bir bitüm numunesinin $G^*.\sin\delta$ değerinin en fazla 5000 kPa olması gerekmektedir. Eğer deney sıcaklığında $G^*/\sin\delta$ değerleri, sınırın altına düşerse o sıcaklıkta deneye tabi tutulan bitüm ile inşa edilecek bir kaplamanın, tekerlek izine karşı direncinin yetersiz olduğu düşünülür. Buna ilaveten, eğer deney sıcaklığında $G^*.\sin\delta$ değeri, üst sınırı aşarsa deneye tabi tutulan bitüm numunesi ile inşa edilecek bir kaplamanın, orta sıcaklıklardaki tekrarlı yüklemeler altında yorulma dayanımının düşük olacağı anlaşılır.

Deneyin Yapılışı:

DSR deneyine başlamadan önce cihaz açılır ve deneyde kullanılacak hareketli plaka deney aletine monte edilir. Burada şuna dikkat edilmelidir; deneyin yürütüleceği sıcaklıklar önceden belirlenmeli ve deneye ondan sonra başlanılmalıdır. Eğer deney orta sıcaklıklarda (PAV ile yaşlandırılmış numuneler için) yürütülecekse 8 mm çapa sahip olan plaka, eğer deney yüksek sıcaklıklarda yürütülecekse 25 mm çapa (yaşlandırılmamış veya RTFO ile yaşlandırılmış numuneler için) sahip olan plaka kullanılacaktır. Plaka seçilip hazır hale getirildikten sonra DSR aletinin plakaları deney sıcaklığına getirmesi sağlanır. Bu esnada, akışkan hale kadar ısıtılmış bitüm numunesi silikon kalıba dökülür. Numunenin hazırlanmasında kalıp kullanımı zorunlu değildir. Numune direk DSR cihazının sabit plakası üzerine de dökülebilmektedir. Eğer kalıp kullanılıyorsa, numune, kalıp soğutulduktan sonra deney sıcaklığına getirilmiş hareketli plakaya yapıştırılarak kalıptan çıkarılır. Numune plakaların arasına yerleştirildikten hemen sonra, hareketli plaka sabit plakaya doğru hareket ettirilir. Plakalar arasında belirli bir boşluk yakalandıktan sonra numunenin taşan kısımları sıcak bir aparat ile tıraşlanır.

Deney, plakalar arasında belirli bir boşluk bırakılarak yürütülür. Bu değer kullanılan DSR'ye göre değişmekle birlikte, tıraşlama işlemi esnasında plakalar arasındaki boşluk bu değerden bir miktar fazla olacak şekilde ayarlanır. Buradaki fazlalık miktarı da yine DSR cihazına göre değişmektedir. Tıraşlama işlemi tamamlandıktan sonra fazla bırakılan boşluk kapatılır ve numunenin kenarında bir dış bükey kavis oluşumu sağlanır. Şekil 3.34'te doğru kavis temsili olarak gösterilmiştir. Bu aşamanın doğru şekilde tamamlanması büyük öneme sahiptir çünkü DSR cihazı, numune çapının kullanılan plakaya eşit olduğunu varsayarak hesap yapmaktadır. Bu sebeple, deneyde kullanılan numune miktarı ne fazla ne de az olmalıdır.



Şekil 3.34. DSR'ye yerleştirilmesi gereken numune miktarı (McGennis vd, 1994)

Numunenin tıraşlanması tamamlandıktan sonra, sıcaklığının deney sıcaklığına dengelenmesi için beklenir. Bu dengelenme süresi 5-10 dk arasında değişmektedir. Eğer 25 mm'lik plakalar kullanılıyorsa en düşük deney sıcaklığından, 8 mm'lik plakalar kullanılıyorsa en yüksek deney sıcaklığından başlanılmalıdır. Isıl denge sağlandıktan sonra DSR yazılımı yardımıyla deney başlatılır. Yazılım yardımıyla, cihaz, gerekli salınım sayısına ulaşıldığında, G^* ve δ değerlerini hesaplar ve bilgisayar üzerinde gösterir.

3.3.5. Eğme Kirişi Reometresi (BBR) Deneyi

BSK'ların düşük sıcaklıklardaki çatlamalara karşı göstereceği direnç, içerisindeki bitümün düşük sıcaklıklardaki performansı ile oldukça yakında ilgilidir. Bitüm numunelerinin düşük sıcaklıklardaki performansını belirlemede ise Superpave şartnamesinde belirtildiği üzere, TS EN 14771 (2012) veya ASTM D6648 (2016) standartlarından herhangi biri dikkate alınarak yürütülen BBR deneyinden faydalanılır. Bu deneyin yürütülebilmesi için BBR cihazına ihtiyaç vardır. BBR deneyinin temel prensibi; düşük sıcaklıktaki bir sıvı banyosuna yerleştirilen, belirli boyutlardaki kiriş şekilli bitüm numunesine, sabit bir yükün belirli bir süre boyunca uygulanıp bitüm numunesinin orta noktasında meydana gelen düşey şekil değiştirmenin kaydedilmesidir. Bu deney sonucunda, iki farklı değer elde edilir: sünme rijitliği (S) ve m-değeri. Sünme rijitliği bitüm kirişinin sabit yükleme altındaki direncini ifade eder. Öte yandan, m-değeri ise sabit yükleme altında bitüm kirişinin rijitliğindeki zamanla meydana gelen değişimin hızını ifade eder.

Superpave şartnamesinde; deneye tabi tutulan bitüm numunesi ile inşa edilecek kaplamaların deney sıcaklığının 10°C altındaki sıcaklıklarda yeterli esnekliğe sahip olması için, bu bitüm numunesinin deney sıcaklığında ve 60. saniyedeki S değerini en fazla 300 MPa ve m-değerinin en az 0.300 olması gerekmektedir. Bu koşulları sağlayan bitüm numuneleri ile inşa edilecek kaplamaların deney sıcaklığının 10°C altındaki sıcaklıklarda, düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumuna karşı yeterli dirence sahip olduğu düşünülmektedir. Burada 60. saniye kritik bir öneme sahiptir. Çünkü SHRP çalışmalarında, kaplamanın maruz kalacağı sıcaklığın 10°C üstünde yürütülen BBR deneyinin 60. saniyesinde elde edilen S değeri ile kaplamanın maruz kalacağı sıcaklıkta yürütülen BBR deneyinin 2. saatinde elde edilen S değerinin eşit olduğu anlaşılmıştır (McGennis vd, 1994).

Sünme rijitliği klasik eğme kirişi teoreminden faydalanılarak bulunur. BBR cihazı aşağıdaki formül yardımıyla otomatik olarak sünme rijitliğini hesaplamaktadır (McGennis vd, 1994):

$$S(t) = \frac{P \times L^3}{4 \times b \times h^3 \times \delta(t)} \quad (3.6)$$

burada, $S(t) = t$. saniyedeki sünme rijitliği, $t=60$ saniye

P = yüklenen sabit yük, 100 g (980 mN)

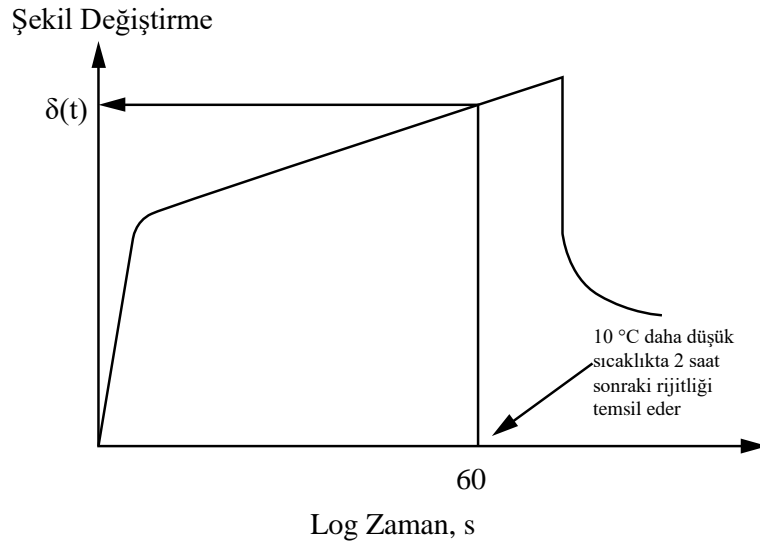
L = kiriş destekleri arasındaki mesafe, 102 mm

b = kiriş genişliği, 12,5 mm

h = kiriş yüksekliği, 6,25 mm

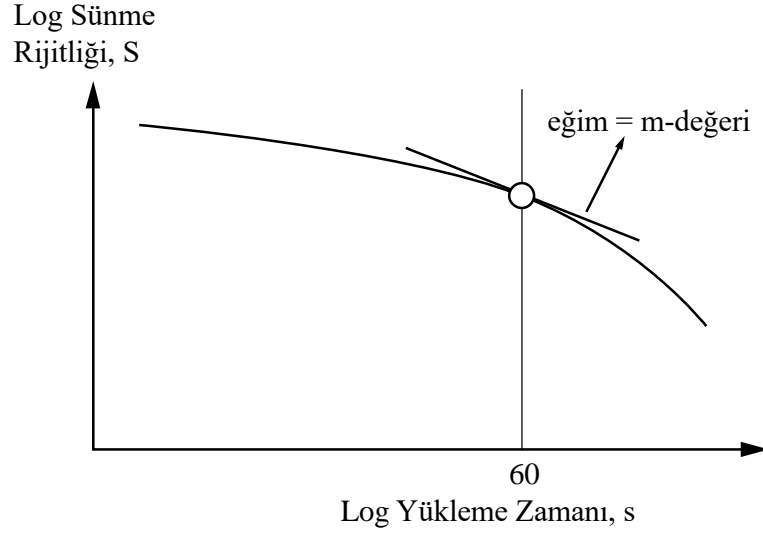
$\delta(t) = t$. saniyedeki şekil değiştirme, $t=60$ saniye

Her ne kadar BBR yazılımı bu hesabı otomatik olarak elde etse de yazılım ekranında meydana gelen şekil değiştirme grafiğini kullanarak bu hesaplamayı manuel bir şekilde yapmak mümkündür (Şekil 3.35) (McGennis vd, 1994).



Şekil 3.35. Manuel yöntemle sünme rijitliğinin hesaplanması (McGennis vd, 1994)

Daha önce belirtildiği üzere, m -değeri S değerinin zamanla değişim hızıdır. Bu değerlerin hesaplama prensibi ise Şekil 3.36'da gösterildiği üzere, logaritmik zaman ve logaritmik S değerleri kullanılarak çizdirilen grafiğin 60. saniyedeki teğetinin eğiminin belirlenmesidir (McGennis vd, 1994).

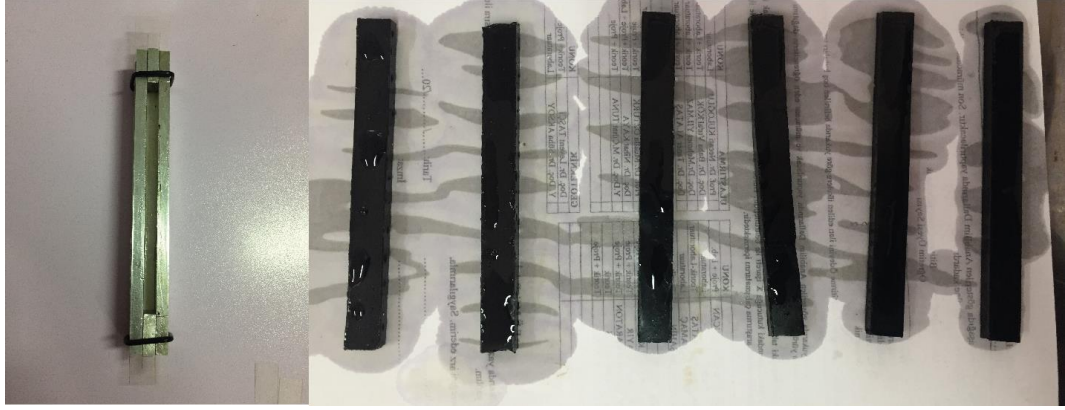


Şekil 3.36. Manuel yöntemle m-değerinin hesaplanması (McGennis vd, 1994)

Deneyin Yapılışı:

Deneye başlanmadan önce mutlaka BBR cihazındaki tüm bileşenlerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Deney parametrelerdeki en küçük değişikliklerin bile deney sonucu üzerinde büyük etkisi olduğu için bu deneyde kalibrasyon kritik bir önem taşımaktadır.

Deneyin başlangıcında, BBR aletinin yanında verilen, paslanmaz çelik kalıplar yardımıyla numune hazırlanır. Öncelikle, numune kalıbının bitüm ile temas edecek kısımlarına yağ sürülür ve buralar belirli boyutlara sahip asetatlar ile kaplanır. Ardından kalıpların uç kısımları kauçuk lastikler ile sıkılır ve böylece kalıp hazırlanmış olur (Şekil 3.37). Bu aşamada asetat ile çelik kalıp arasında numunenin şeklini bozacak hava kabarcıklarının olmamasın özen gösterilir. Kalıplar hazırlandıktan sonra, akışkan hale gelene kadar ısıtılmış PAV ile yaşlandırılmış bitüm numunesinden kalıbın içerisine (kalıp kapasitesinin biraz üstünde) dökülür. Bitüm numunesi kalıba dökülürken işlemin kalıbın bir ucundan diğer ucuna tek seferde yapılmasına dikkat edilmelidir. Bitüm kalıp içerisine aktarıldıktan sonra 45-60 dakika oda sıcaklığına kadar soğuması beklenir. Bu sürenin sonunda bitüm numunesinin, kalıbın üstünde kalan kısımları sıcak bir spatula yardımıyla tıraşlanır. Kalıp içerisindeki bitüm numuneleri oda sıcaklığında bekletilir. Kalıplardan çıkarılmadan önce soğuk bir ortamda en fazla 5 dakika bekletilerek kalıptan çıkarılması kolaylaştırılır. Ancak, bu soğuk ortamın sıcaklığı deney sıcaklığına en fazla 10°C yaklaşmalıdır.



Şekil 3.37. BBR numune kalıbı ve deney için hazırlanan numuneler

Deney numunesi kalıbından çıkarılmadan önce, BBR cihazı çalıştırılıp deney sıcaklığına dengelenmesi sağlanmalıdır. BBR cihazı deney sıcaklığına geldikten sonra, bitüm kirişi kalıptan çıkarılır ve BBR cihazının sıvı banyosuna yerleştirilir. Deney başlangıcı ile numunenin sıvı banyosuna yerleştirilmesi arasında en fazla 60 ± 5 dk geçebilir. Bitüm numunesi belirli bir süre sıvı banyosunda bekletildikten sonra cihazdaki mesnetlere yerleştirilir. Numuneye ilk olarak 35 ± 10 mN büyüklüğünde temas yükü uygulanır. Bu yükün süresi en fazla 10 saniye olmalıdır. Ardından, numuneye 1 ± 0.1 saniyelik 980 \pm 50 mN büyüklüğünde bir oturma yükü uygulanır. Bu ani yükleme ile bitüm kirişinin mesnetlere tam olarak oturtulması sağlanır. Bu yüklemenin ardından 35 ± 10 mN temas yükünde bitüm kirişi, meydana gelen şekil değiştirmenin geri kazanılması için 20 ± 0.1 saniye bekletilir. Bu sürenin sonunda, numuneye 980 \pm 50 mN büyüklüğünde deney yükü 240 saniye boyunca uygulanır. Bu süre boyunca, deney yazılımı 0.5 saniye aralıklarla kirişte meydana gelen şekil değiştirmeleri kaydeder, sünme rijitliğini ve m-değerini hesaplar. Böylece deney tamamlanmış olur. Deney ekranında 60. saniyede okunan S ve m-değeri şartname kriterleri ile kıyaslanarak deney sıcaklığında bitüm numunesinin performansı değerlendirilir. Ayrıca, deney boyunca yapılan tüm yüklemelerin yazılım ekranında doğru değerlerde olup olmadığı kontrol edilmelidir.

3.4. Modifiyeli Bitümlerin Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi

3.4.1. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Katı, sıvı ya da gaz haldeki numunelerden, kızılötesi (*infrared*) spektrumu elde edilmesi için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (*FT-IR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) tekniği kullanılmaktadır. FT-IR spektroskopisinde ışımaya şiddeti zamana bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sayede, her dalga boyu

için ayrı taramalar yapılmadan hızlı bir şekilde yüksek çözünürlükteki spektrumlar elde edilebilir. Bu teknik ile moleküler bağların karakterizasyonu yapılarak, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, organik bileşiklerin yapılarındaki fonksiyonel gruplar, yapıdaki bağların yerleri ve durumlar tespit edilebilmektedir. Bunlarla birlikte, FT-IR, C ve H gibi elementleri içeren minerallerin çalışılmasında, mineral yapı içerisindeki uçucu bileşenlerin yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Yılmaz, 2016).

Bu çalışmada, Bruker Tensor 27 model cihaz (Şekil 3.38) kullanılarak saf ve modifiyeli bitüm numunelerinin yapılarındaki kimyasal değişimler FT-IR analizi ile belirlenmiştir. Yaklaşık 1-2 mg bitüm numunesi cihazın numune yerleştirme kısmına yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında analizler yapılmıştır.



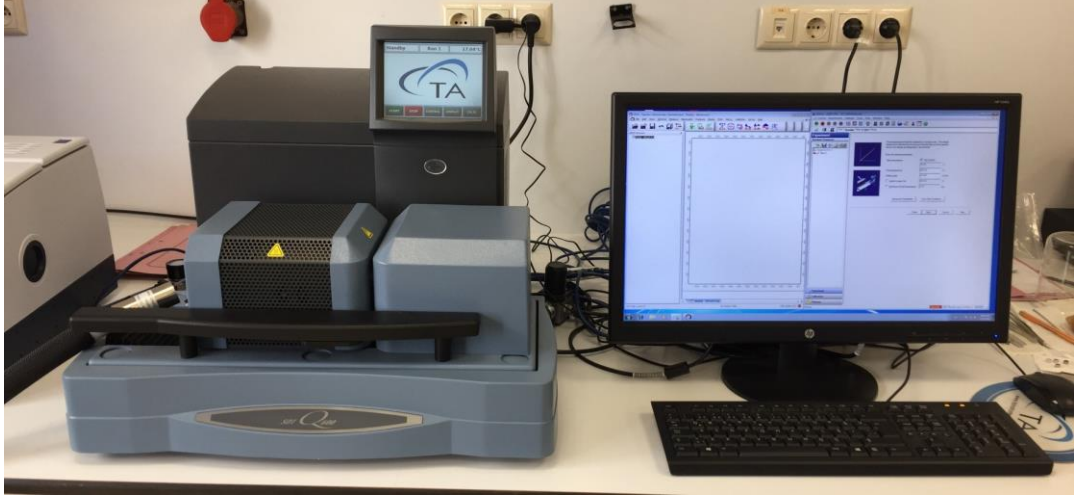
Şekil 3.38. Bruker Tensor 27 model FT-IR cihazı

3.4.2. Termogravimetrik Analiz (TG)

Numune sıcaklığına veya zamana göre numunenin ağırlığının yani kütlesinin ölçülmesine Termogravimetrik (TG) analiz denilmektedir. Genellikle, TG analizlerinde, numune sabit bir sıcaklık değerinde tutulur veya sabit bir sıcaklık değerine ısıtılır. Analiz sonrası elde edilen TG eğrilerinin birinci dereceden türevlerinin alınmasıyla DTG eğrileri çizilebilmektedir. Zamana veya sıcaklığa bağlı olarak oluşturulabilen DTG eğrileri kütle değişimini göstermektedir (Yılmaz, 2016). TG analizleri sonucunda numunelerin ısıl bozunma sıcaklıkları ve kütsel değişimleri belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, TA Instruments Q600 SDT model cihaz (Şekil 3.39) kullanılarak TG analizleri yürütülmüştür. Hazırlanan bitüm numunelerinden keskin bir alet

yardımıyla 7-10 mg numune alınarak, platinyum pota içerisinde yerleştirilmiştir. Analiz, 20°C sıcaklıktan başlanarak 10°C/dk'lık sıcaklık artış hızında 1000°C sıcaklığa kadar yürütülmüştür.



Şekil 3.39. TA Instruments Q600 SDT model TG analizi cihazı

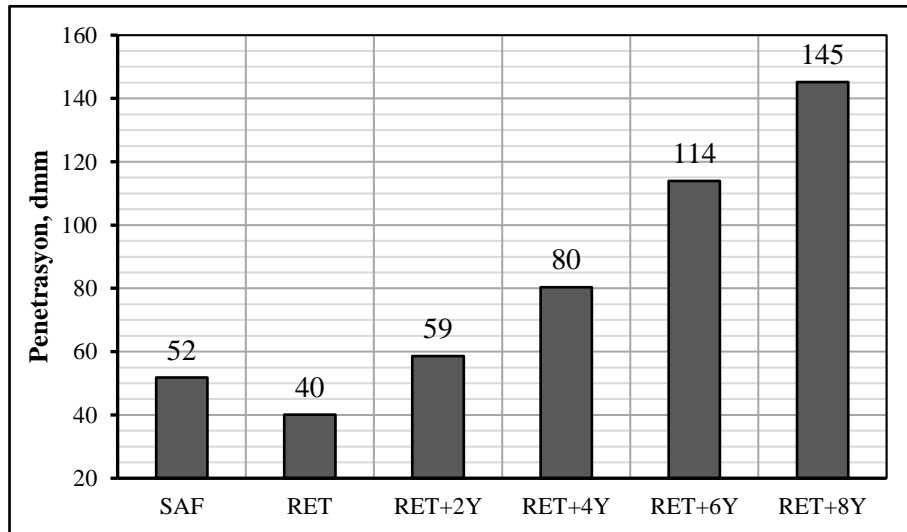
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Fiziksel Özellikler ile İlgili Bulgular

4.1.1. Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Şekil 4.1'de yapılan penetrasyon deneylerine ait sonuçlar grafik halinde verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1.5 oranında RET ilavesiyle penetrasyon değerinde %23.1 azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, RET modifikasyonunun saf bitümü sertleştirdiğini ve kıvamlılığını artırdığını göstermektedir. RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edildikçe artan yağ miktarına paralel olarak penetrasyon değerinde de bir artışın meydana geldiği görülmektedir. Saf bitüme RET ile birlikte %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilavesi, saf bitümün penetrasyon değerini sırasıyla %13.5, %53.8, %119.2, %178.8 oranlarında arttırmıştır. Bu değerler bitkisel atık yağ ilavesinin, RET modifiyeli bitümü yumuşattığını ve RET modifiyeli bitümün kıvamlılığını azalttığını göstermektedir.

Bitüm modifikasyonunda RET ile birlikte farklı oranlarda bitkisel atık yağ kullanıldığında %0-2 aralığında bitkisel atık yağ ilavesi kompozit modifiyeli bitümün penetrasyon değerinin saf haldeki bitümün penetrasyon değerine yakın olmasını sağlayacaktır.

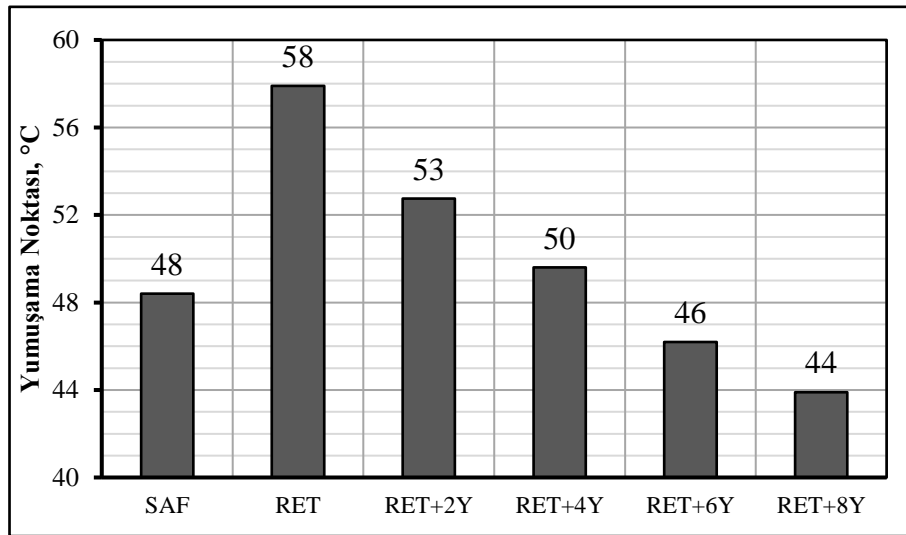


Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi sonuçları

4.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Şekil 4.2’de yumuşama noktası deneyine ait sonuçlar grafik halinde verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1.5 oranında RET ilavesiyle yumuşama noktası değerinin %20.8 arttığı görülmektedir. Bu durum, penetrasyon deneyi sonuçlarına benzer şekilde RET ilavesiyle saf bitümün sertleştiğini ve kıvamlılığının arttığını göstermektedir. Saf bitüme RET ile birlikte %2 ve %4 oranında bitkisel atık yağ ilave edildiğinde saf bitümün yumuşama noktası değerinin sırasıyla %10.4 ve %4.2 arttığı gözlemlenmektedir. Ancak, RET ile birlikte %6 ve %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilave edilmesi durumunda ise saf bitümün yumuşama noktasının sırasıyla %4.2 ve %8.3 oranlarında azaldığı görülmektedir. Genel bir ifadeyle, RET ilavesi bitümü sertleştirirken bitkisel atık yağ ilavesi bitümü yumuşatmıştır.

Bitüm modifikasyonunda RET ile birlikte farklı oranlarda bitkisel atık yağ kullanıldığında %4-6 aralığında bitkisel atık yağ ilavesi kompozit modifiyeli bitümün yumuşama noktasının saf haldeki bitümün yumuşama noktasına yakın olmasını sağlayacaktır. Bu aralık, penetrasyon deneyinde %0-2 olarak bulunmuşken yumuşama noktası deneyinde farklılık göstermiştir.



Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi sonuçları

4.1.3. Penetrasyon İndeksleri

Bitüm endüstrisinde uzun yıllardan beri bitümlerin sıcaklık hassasiyetlerinin belirlenmesinde yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinin sonuçlarından yola

çıkılarak hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) kullanılmaktadır. PI, bitümün kıvamlılığındaki değişimi ifade etmektedir ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(\text{Pen}25) - 20 \times YN}{50 \times \log(\text{Pen}25) - YN - 120} \quad (4.1)$$

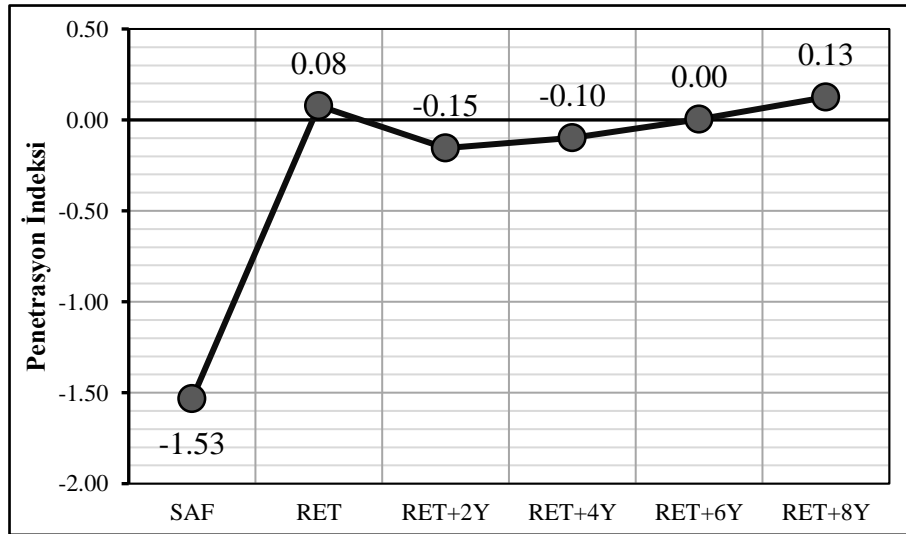
Burada, Pen25: Bitümün 25 °C sıcaklıktaki penetrasyon değeri (dmm),

YN: Bitümün yumuşama noktasıdır (°C).

PI değeri arttıkça bitümün sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, düşük sıcaklık çatlaklarına ve tekerlek izine karşı direncinin arttığı düşünülmektedir.

Yukarıdaki formül ve ilgili deney sonuçlarından faydalanılarak PI'leri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te bir grafik halinde verilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde, saf bitümün -1.53 PI'ne sahip olduğunu görmek mümkündür. Bu değer saf bitümün sıcaklık hassasiyetinin yüksek olduğunu, düşük sıcaklık çatlaklarına ve tekerlek izine karşı direncinin düşük olduğunu göstermektedir. Saf bitüme %1.5 oranında RET ilave edildiğinde PI değeri %105.2 artmıştır. Ayrıca, saf bitüme %1.5 oranında RET ile birlikte %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilavesi, saf bitümün PI'ni sırasıyla %90.2, %93.46, %100, %108.5 oranlarında arttırmıştır.

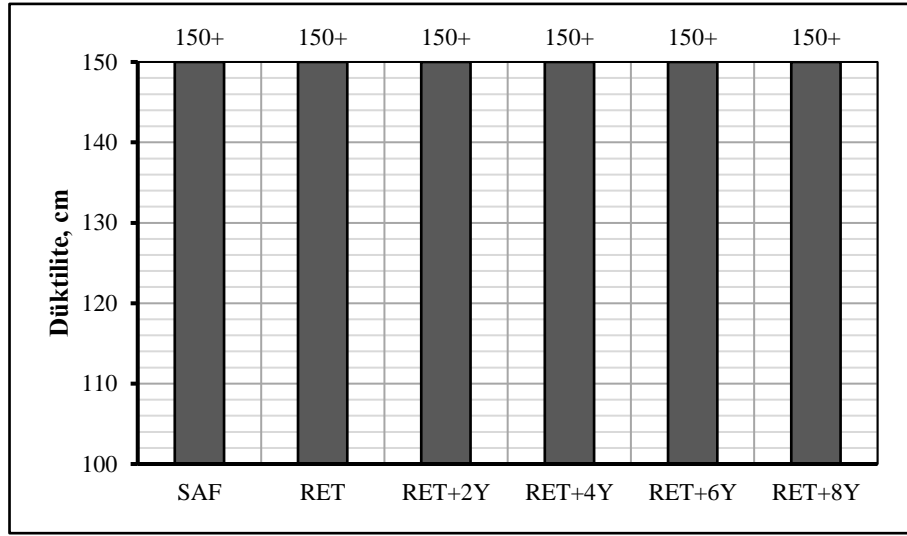
Saf bitümün modifikasyonla PI değerlerindeki değişimi özetlendiğinde hem RET ilavesinin hem de RET ile birlikte atık yağ ilavesinin saf bitümün PI değerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ilginç bir şekilde, bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesiyle hem bitümde bir yumuşama meydana geldiğini hem de bitümün ısıl hassasiyetinde bir azalmanın söz konusu olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. Penetrasyon indeksleri (PI)

4.1.4. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi Sonuçları

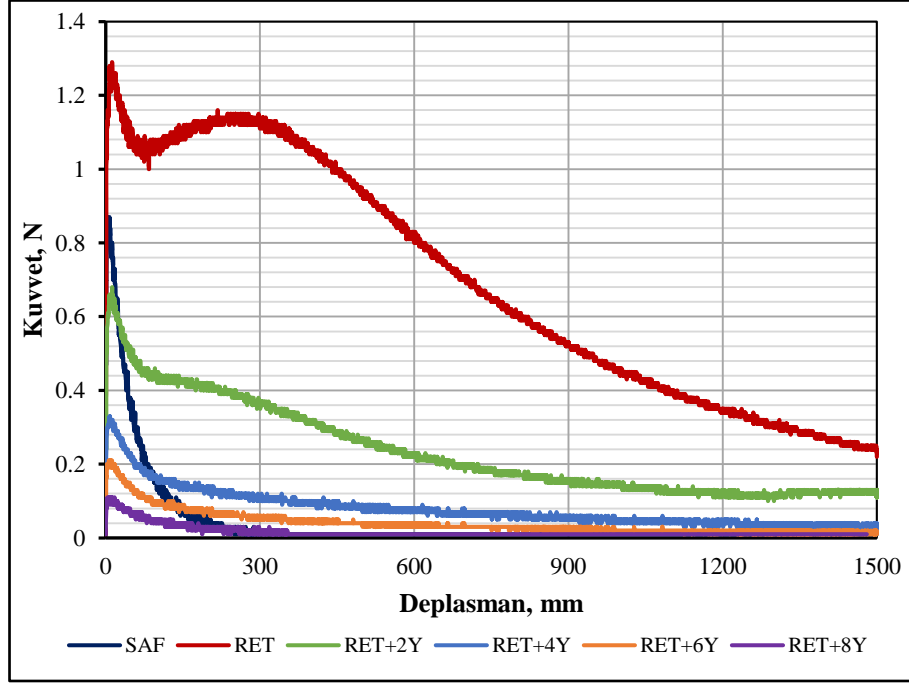
25°C'lik sıcaklıkta yürütülen düktilite deneyinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te grafik halinde gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, deney cihazının ölçüm yapabildiği maksimum uzaklık sınırında numunelerin hiçbirinde bir kopma gözlemlenmemiştir. Bu durum, numunelerin kohezyonu ile ilgili kesin bir yargıya varmanın önüne geçmektedir. Genel olarak ise, saf bitüme hem RET hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edilmesinin saf bitümün kohezyonu üzerinde negatif bir etkisinin olmadığı tahmin edilebilir.



Şekil 4.4. Düktilite sonuçları

Hazırlanan numunelerin kohezyon özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla düktilite cihazının kuvvet ölçümü dikkate alınmıştır. Tüm numuneler için elde edilen yük ve şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.5'te kıyaslamının daha yapılabilmesi amacıyla toplu halde verilmiştir. Deney 25°C'lik sıcaklıkta gerçekleştirildiği için elde edilen yük değerleri nispeten küçük çıkmakla birlikte literatürde bu sıcaklıkta yapılan deneylerin sonuçlarına yakın çıkmıştır (Pereira vd, 2018). Şekil 4.5 incelendiğinde saf bitümün yaklaşık 0.9 N değerinde bir pik sergilediği ve hemen ardından ölçülen kuvvette ani bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Saf bitüme %1.5 RET ilave edildiğinde ise hem pik değerinin yaklaşık 1.3 N'a yükseldiği hem de pik sayısının ikiye çıkıp ani bir yük kaybının oluşmadığı görülmektedir. Bu davranış beklenildiği üzere literatürde PMB'ler için yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir (Pereira vd, 2018). Saf bitüme RET ile birlikte bitkisel atık yağın ilave edildiği numunelere ait sonuçlar incelendiğinde meydana

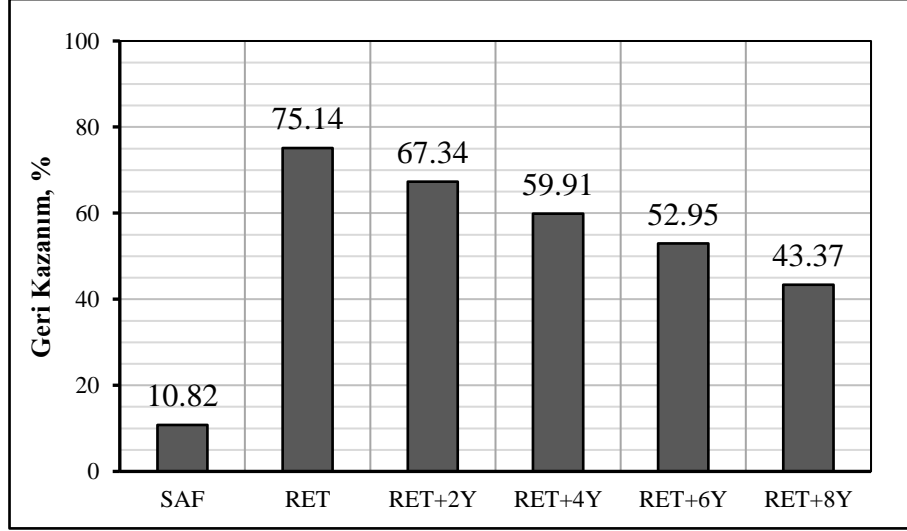
gelen pik değerinin %2 oranında atık yağ ilavesiyle bile bir düşüş sergilediği görülmektedir. Artan bitkisel atık yağ oranına paralel olarak pik değerindeki düşüş devam etmiştir. Fakat özellikle %2 ve %4 yağ katkılı numunelerin sonuçlarında kaydedilen kuvvet ölçümlerinde bir ani düşüş gözlemlenmemiştir. Bu durum, RET ile birlikte %2 ve %4 oranlarında atık yağ kullanılması halinde kohezyon açısından RET modifiyeli bitüm ile saf bitüm arasında kalınacağını göstermektedir.



Şekil 4.5. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi sonuçları

4.1.5. Elastik Geri Kazanım Deneyi Sonuçları

Düktilite cihazında gerçekleştirilen ve polimer modifikasyonunun etkisinin net bir şekilde görülmesini sağlayan elastik geri kazanım deneyine ait sonuçlar Şekil 4.6'da grafik halinde verilmiştir. Bu deney sonucunda hazırlanan numunelerin elastiklik performansları değerlendirilebilmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde saf bitümün elastikliğinin oldukça düşük olduğu ve geri kazanım yüzdesinin sadece %10.82 olduğu anlaşılmaktadır. Saf bitüme %1.5 oranında RET ilavesi saf bitümün elastikliğini olumlu yönde etkilemiş ve geri kazanım yüzdesini %594.5 arttırmıştır. Saf bitüme RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilavesi, RET'in gösterdiği olumlu etkiyi azaltmıştır. Buna rağmen, saf bitüm ile RET ve %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ ilaveli numuneler kıyaslandığında elastik geri kazanım yüzdesinde sırasıyla %522.4, %453.7, %389.4, %300.8 artış sağlandığı görülmektedir.

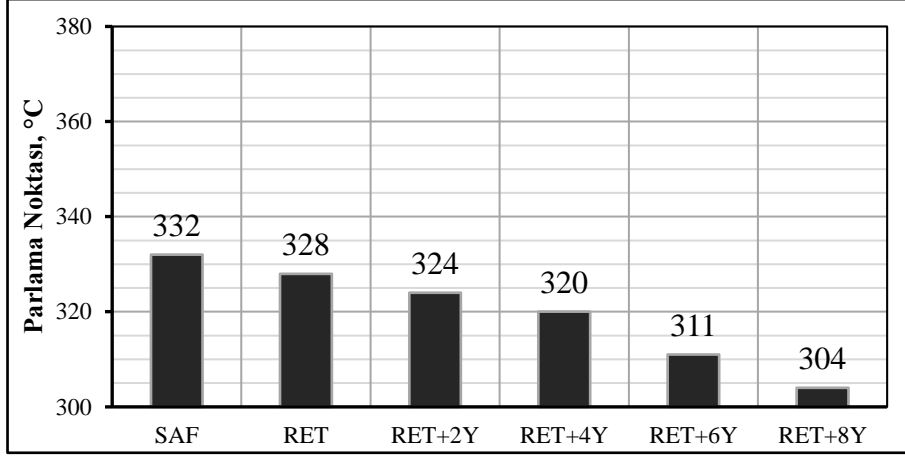


Şekil 4.6. Elastik geri kazanım deneyi sonuçları

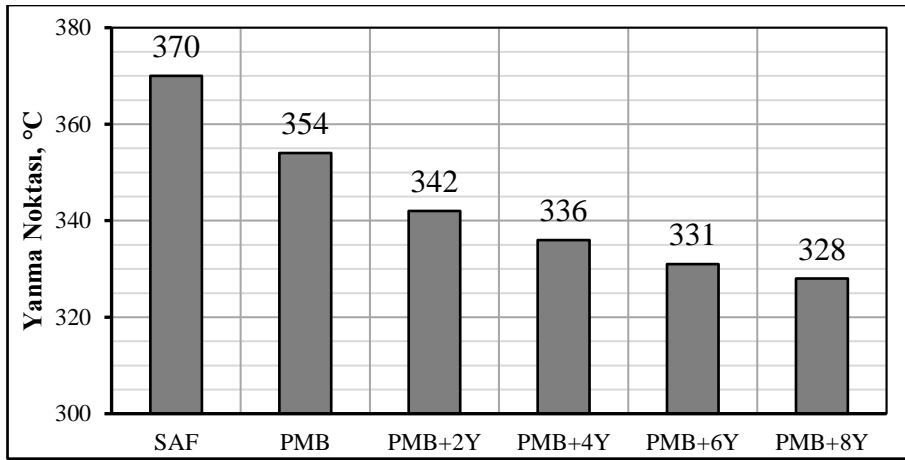
Elastik geri kazanım deneyleri sonucunda, genel olarak, hem RET modifikasyonunun hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ kullanılarak elde edilen modifikasyonun saf bitümün elastiklik özelliğini olumlu yönde etkilediğini söylemek mümkündür.

4.1.6. Yanma ve Parlama Noktası Deneyi Sonuçları

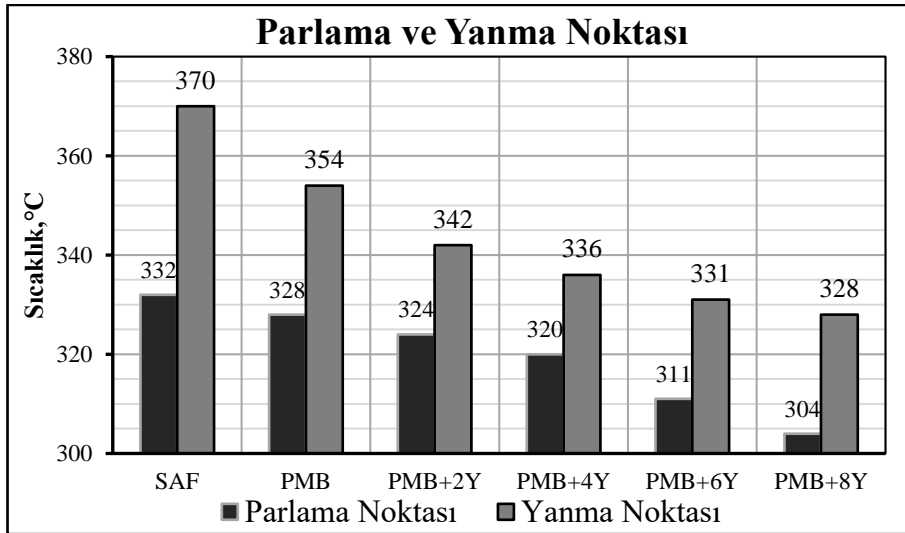
Cleveland açık kabı kullanılarak yürütülen parlama ve yanma deneylerine ait sonuçlar, ayrı ayrı, sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilirken bu iki deneye ait sonuçlar Şekil 4.9’da toplu bir halde verilmiştir. Bu deneylerin sonuçları özellikle iş sağlığı ve güvenliği açısından önem arz etmektedir. Tehlikeli bir durumun söz konusu olmaması için bitüm numunelerinin yanma ve parlama noktalarının bitümün işlendiği sıcaklıkların yakınında olmaması gerekmektedir. Şekil 4.9’da, saf bitüme hem RET hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edilmesi durumlarında yanma ve parlama noktalarında bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Özellikle yağ ilavesinde belirginleşen bu düşüşün atık yağın bitüme kıyasla daha yanıcı bir malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna rağmen, elde edilen en düşük değer RET+8Y numunesine ait 304°C’lik parlama noktasıdır ve bu sıcaklık değeri bitümün işlendiği sıcaklıkların çok üstündedir. Bu sebeple, hazırlanan modifiyeli bitümlerin iş sağlığı ve güvenliği açısından herhangi bir tehlikeye neden olmayacakları düşünülmektedir. Buna ilaveten, tüm numunelere ait parlama noktaları, Superpave sınıflandırmasındaki (ASTM D6373, 2021) minimum sınır olan 230°C’nin üstündedir.



Şekil 4.7. Parlama noktası deneyi sonuçları



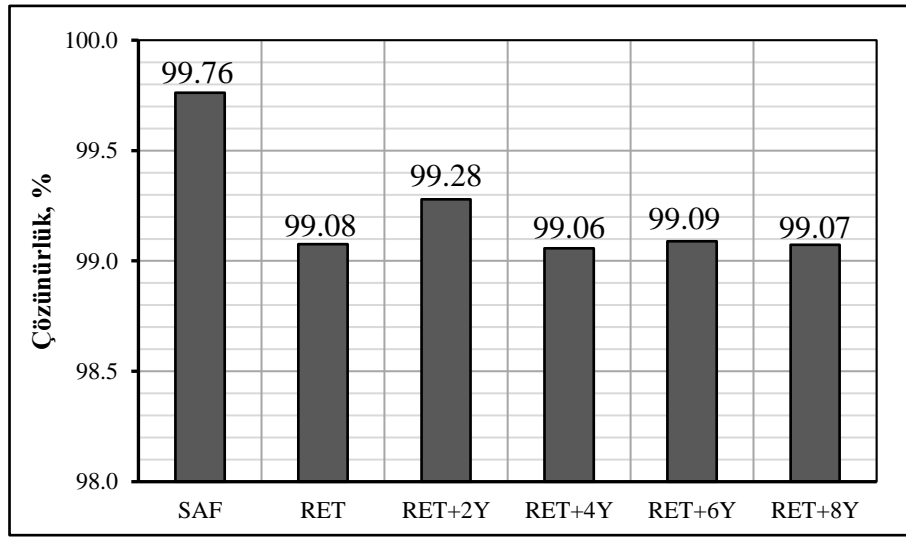
Şekil 4.8. Yanma noktası deneyi sonuçları



Şekil 4.9. Parlama ve yanma noktası deneyleri sonuçları

4.1.7. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi Sonuçları

Bitüm içerisindeki yabancı madde miktarının tayininde kullanılan trikloretilende çözünürlük deneyine ait sonuçlar Şekil 4.10'da görülmektedir. İlgili grafik incelendiğinde katkı malzemesi miktarı ile çözünürlük yüzdesi arasında herhangi bir bağlantı bulunamamıştır. Ancak, hazırlanan tüm numunelerin şartname sınırı olan %99 değerini sağladığı görülmektedir. Genel olarak, saf bitüme RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edilmesinin çözünürlük değeri açısından herhangi bir problem teşkil etmeyeceği düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Trikloretilende çözünürlük deneyi sonuçları

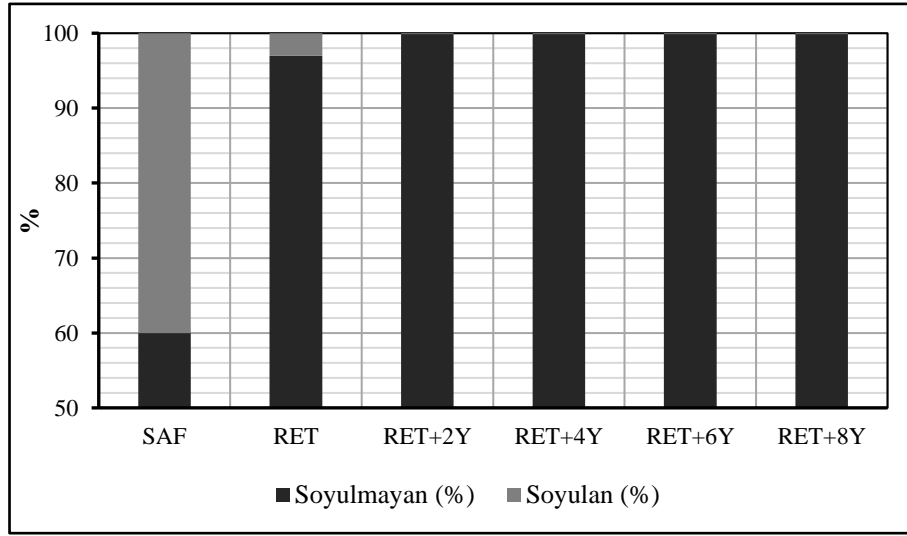
4.1.8. Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Bitüm ile agrega arasındaki adezyonun temsil edildiği Nicholson soyulma deneyine ait sonuçlar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde, saf bitüm numunesinin %40'ının koşullandırma işlemi sonrasında agrega yüzeyinden soyulduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.12'de saf bitüm numunesinin sonucu dikkatlice incelendiğinde agrega yüzeyinden soyulmaların agregaların kenar ve köşeleri gibi kritik bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Sonuçlar doğrultusunda saf bitüm, KGM Teknik Şartnamesi'ndeki (KGM, 2013) %60'lık soyulma direncini sınır değerinde sağlamaktadır.

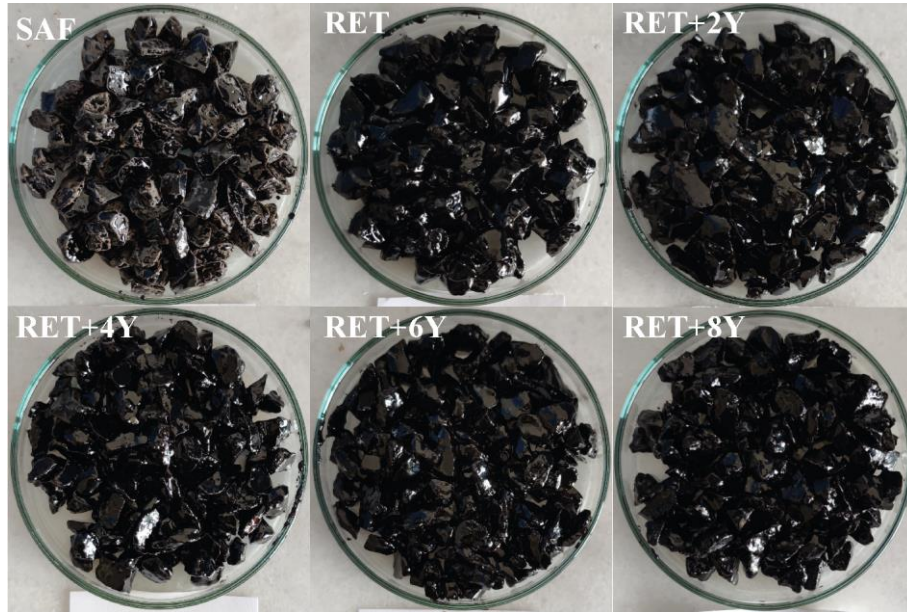
Saf bitüme %1.5 oranında RET ilave edildiğinde soyulma direncinde gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca, saf bitüme RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edildiğinde agrega ile bitüm arasındaki adezyon maksimum seviyeye çıkmış ve koşullanma sonrası agrega yüzeyinden neredeyse hiç bitüm soyulmamıştır. Bu

durum, bitkisel atık yağın kompozit modifikasyonda kullanımının adezyon üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu kanıtlamaktadır. Bu etkinin, bitkisel atık yağın bitümü yumuşatarak agreganın pürüzlü kısımlarının içerisine daha iyi tutunmasını sağlamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Tüm bu sonuçlara ilaveten, RET ile birlikte %2, %4, %6, %8 yağ oranlarında bitkisel atık yağ kullanımında herhangi bir soyulma gözlemlenmemesine rağmen, %2 atık yağ ilavesinde diğer numunelere kıyasla dirilik ve duruluk açısından en iyi sonuç elde edilmiştir.



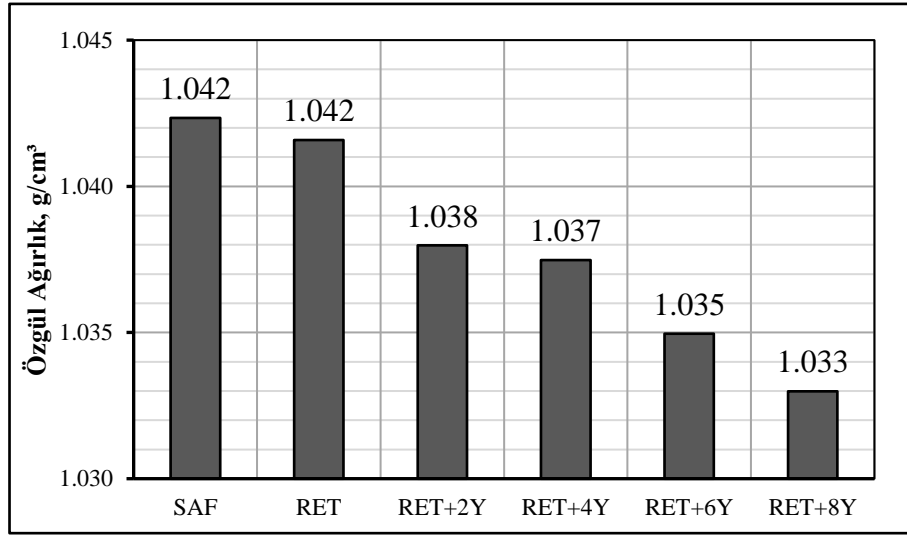
Şekil 4.11. Nicholson soyulma deneyi sonuçları



Şekil 4.12. Nicholson soyulma deneyi sonrası hazırlanan numunelerin görüntüleri

4.1.9. Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Şekil 4.13'te yapılan özgül ağırlık deneylerine ait sonuçlar verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, saf bitüme RET ilave edildiğinde özgül ağırlıktaki değişimin nispeten az olduğu fakat RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edilmesi halinde özgül ağırlıkta bir azalmanın meydana geldiğini söylemek mümkündür. Bitkisel atık yağ miktarındaki artışla ters orantılı olarak özgül ağırlıkta bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durumun sebebinin, bitkisel atık yağın özgül ağırlığının bitüme kıyasla daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

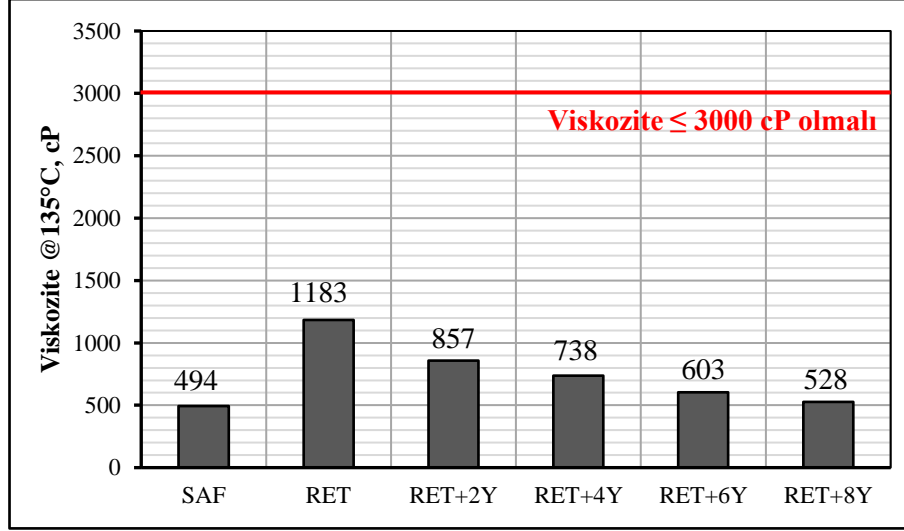


Şekil 4.13. Özgül ağırlık deneyi sonuçları

4.2. Reolojik Özellikler ile İlgili Bulgular

4.2.1. RV Deneyi Sonuçları

Bitümlerin uygulama esnasında, karıştırılabilir ve pompalanabilir halde olacağından emin olmak amacıyla Superpave şartnamesi, 135°C sıcaklıkta #21 numaralı mil (*spindle*) kullanılarak 20 dev/dk dönme hızında gerçekleştirilen RV deneyi sonrasında, bitüm numunesine ait viskozite değerinin en fazla 3 Pa·s (3000 cP) olmasını istemektedir (ASTM D6373, 2021). Bu çalışmada hazırlanan numunelere ait 135°C sıcaklıkta #21 numaralı mil kullanılarak yürütülen RV deneyi sonuçları şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde hazırlanan tüm numunelerin 3000 cP'lik şartname üst sınırını aşmadığı görülmektedir. Buradan yola çıkılarak bu çalışmada hazırlanan modifiyeli bitümlerin, uygulama esnasında yeterli işlenebilirliğe sahip olacakları söylenebilir.



Şekil 4.14. 135 °C sıcaklıkta #21 numaralı mil ile gerçekleştirilen RV deneylerine ait sonuçlar

RV deneyi ile belirlenebilen bir diğer önemli husus karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarıdır. Her ne kadar tüm numuneler işlenebilirlik ile ilgili şartname kriterini sağlamış olsa da bunların işlenebilir hale gelmesi tesislerde belirli bir sıcaklığa maruz bırakılması ile mümkün olmaktadır. Bu sıcaklık değerinin yüksek olması özellikle polimer modifiyeli bitümlerde rastlanılan bir durumdur. Yüksek sıcaklıkların kullanılması ise hem karbon emisyonunu artırarak çevre kirliliğinin artmasına sebep olmakta hem de bitüm ile çalışan işçilerin sağlıkları ile ilgili çeşitli problemler ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi ve bu sıcaklıklar üzerinde RET ve RET+bitkisel atık yağ modifikasyonunun etkisinin incelenmesi önem arz etmektedir.

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenebilmesi için #21 numaralı mil kullanılarak numunelere farklı sıcaklıklarda (120°C, 135°C, 165°C, 180°C) RV deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.15'te grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafik üzerinde, 170±20 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar hesaplanarak karıştırma sıcaklıklarını, 280±30 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar hesaplanarak ise sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek mümkündür. Şekil 4.16'da karıştırma sıcaklıklarına ait sonuçlar alt ve üst sınırlar belirtilerek gösterilmiştir. Şekil 4.17'de ise sıkıştırma sıcaklıklarına ait sonuçlar benzer şekilde gösterilmiştir. Şekil 4.18'de hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıkları tek bir grafikte her birinin alt ve üst sınırlarının ortalaması alınarak gösterilmiştir. Bu grafik üzerinde hata çizgileri yardımıyla alt ve üst sınırlar da gösterilmiştir. Bunlara ilaveten,

numunelere ait viskozite değerleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla, Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

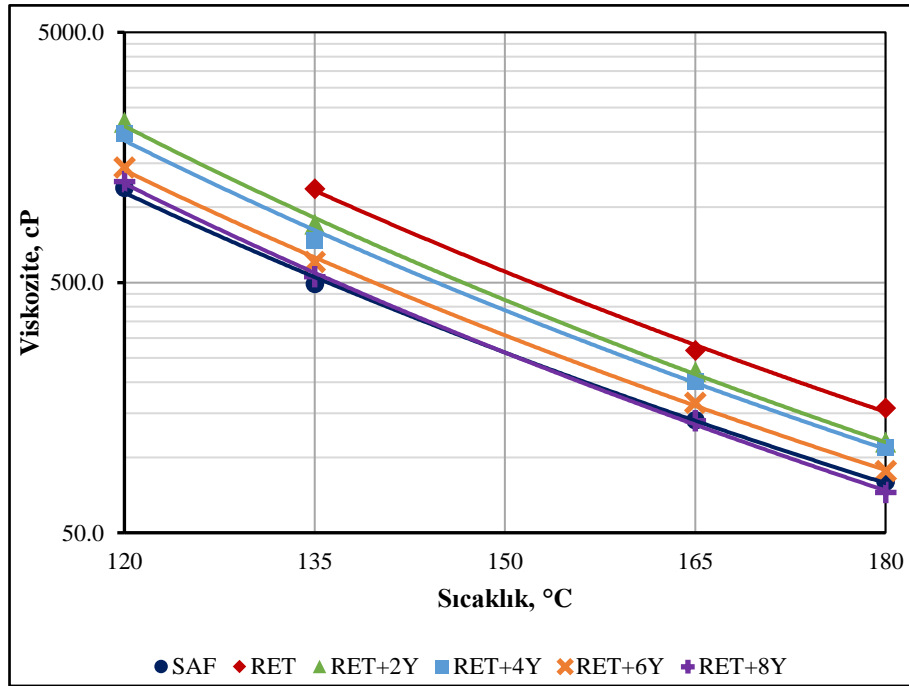
Tablo 4.1. #21 numaralı mil ile yürütölen RV deneyine ait sonuçlar, cP

Numune Kodu	Sıcaklıklar (°C)			
	120	135	165	180
SAF	1192.7	494.2	140.8	80.0
RET	EEE*	1183.3	267.5	157.5
RET+2Y	2185.3	856.7	220.0	115.0
RET+4Y	1967.0	737.5	200.8	110.0
RET+6Y	1440.3	603.3	165.0	88.3
RET+8Y	1265.3	527.5	140.0	72.5

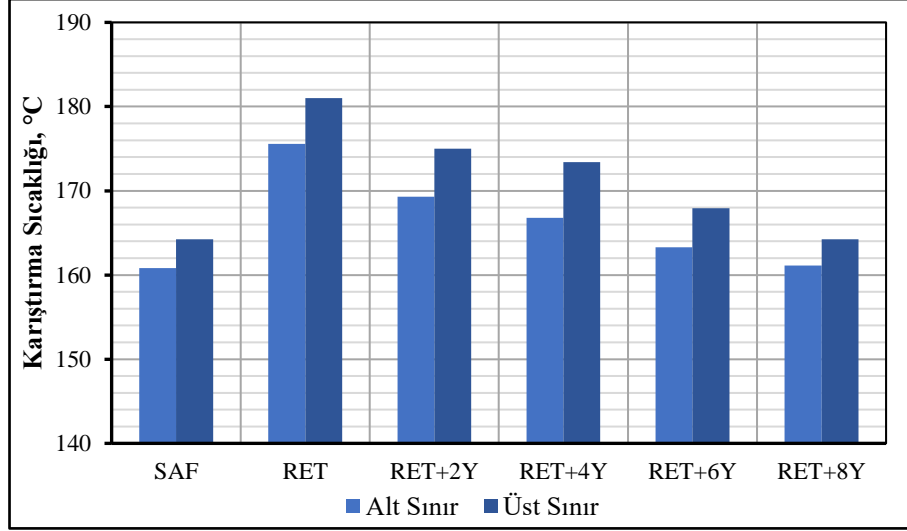
*EEE, belirtilen sıcaklıkta #21 numaralı mil ile yürütölen RV deneyinden elde edilen sonucun cihazın kapasitesinin üstünde olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 4.2. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

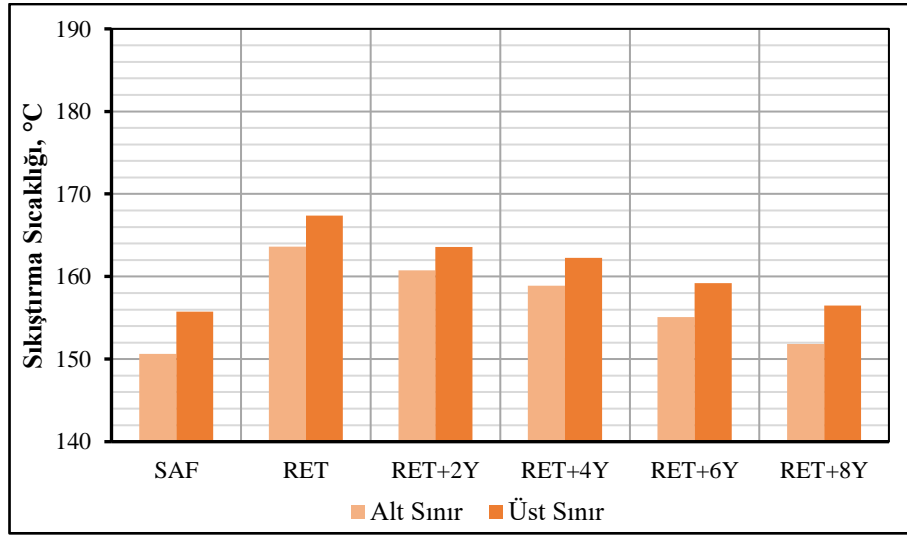
Numune Kodu	Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
SAF	160.8-164.2	150.6-155.7
RET	175.6-181.0	163.6-167.4
RET+2Y	169.3-175.0	160.8-163.6
RET+4Y	166.8-173.4	158.9-162.3
RET+6Y	163.3-167.9	155.1-159.2
RET+8Y	161.1-164.2	151.8-156.5



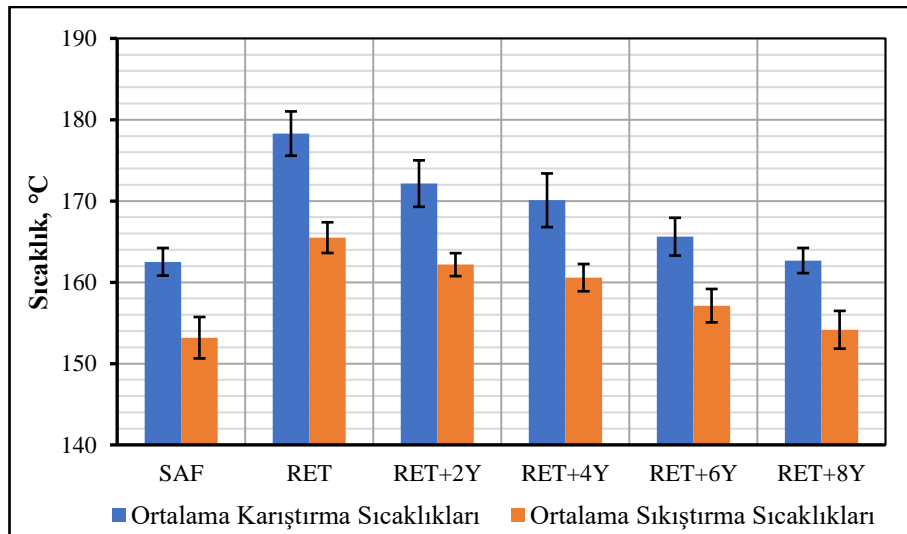
Şekil 4.15. #21 numaralı mil ile 120, 135, 165, 180 °C sıcaklıklarda yapılan RV sonuçları



Şekil 4.16. 170±20 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar ile belirlenen karıştırma sıcaklıkları



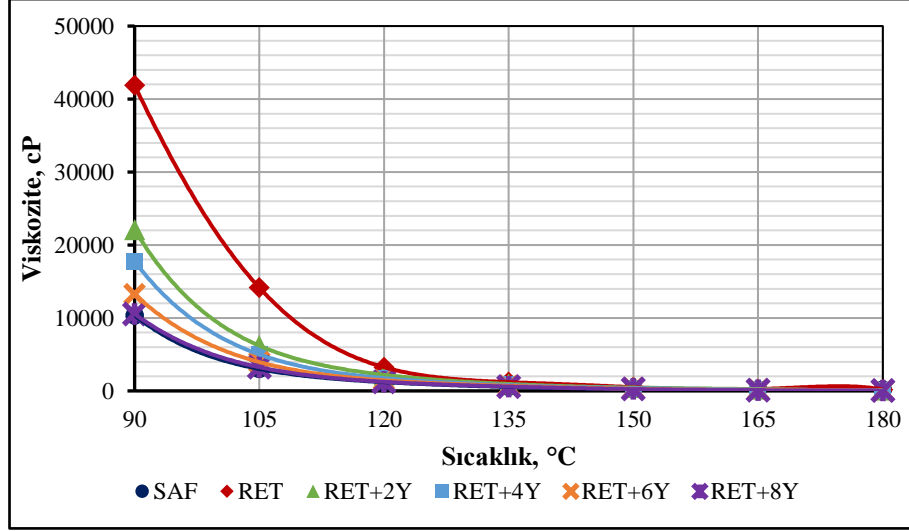
Şekil 4.17. 280±300 cP viskoziteye denk gelen sıcaklıklar ile belirlenen sıkıştırma sıcaklıkları



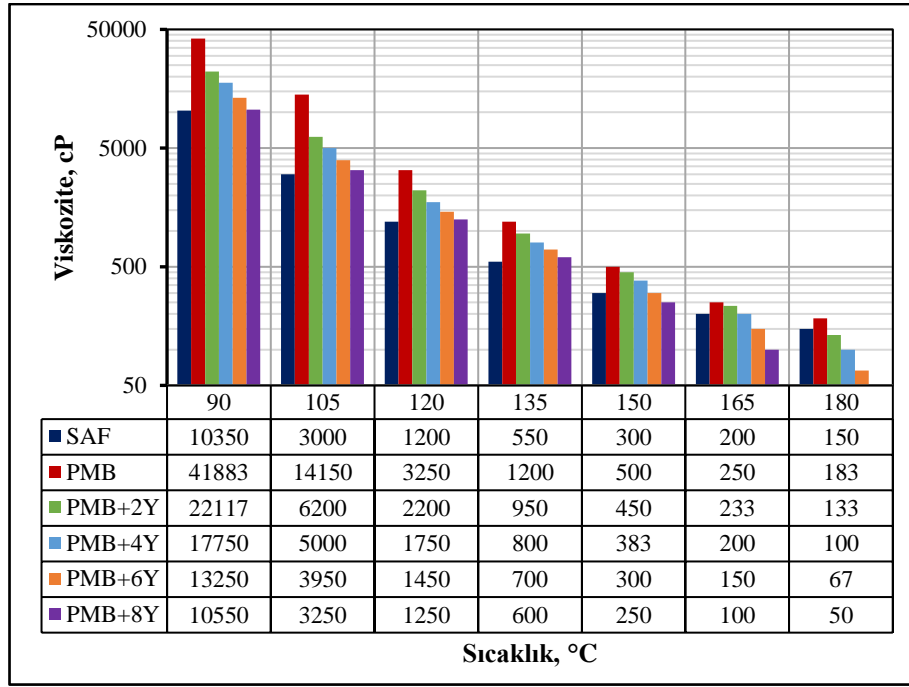
Şekil 4.18. Numunelere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesine dair bir özet anlamını taşıyan Şekil 4.18 incelendiğinde, saf bitüme RET ilave edildiğinde karıştırma sıcaklığının yaklaşık 163°C'den 178°C'ye çıktığı, sıkıştırma sıcaklığının ise 153°C'den 166°C'ye çıktığı görülmektedir. Bu durum, RET modifiyeli bitümün saf bitüme kıyasla daha fazla karbon emisyonuna sebep olacağı ve dolayısıyla çevreye verilen zararı arttıracığı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesiyle artan bitkisel atık yağ miktarıyla ters orantılı olarak hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş meydana gelmiştir. RET modifiyeli bitüme %8 oranında bitkisel atık yağ ilave edildiğinde RET modifiyeli bitümün karıştırma sıcaklığı 178°C'den 163°C'ye, sıkıştırma sıcaklığı ise 166°C'den 154°C'ye düşmüştür. Buradan anlaşılacağı üzere, RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları saf bitüme oldukça yakındır. Bu durum, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşürülebileceği ve bu sayede çevreye verilen zararın azaltılabileceği anlamına gelmektedir.

RV cihazı ile ilgili yapılan tüm bu deneylere ilave olarak kullanılan #21 numaralı mil #29 numaralı mil ile değiştirilerek cihazda daha geniş sıcaklık aralığında hazırlanan numunelerin viskozite ölçümleri yapılmıştır. #21 numaralı mil ile 2500 cP değerine kadar viskozite ölçümü yapılabilirken #29 numaralı mil ile 50000 cP değerine kadar ölçüm yapılabilir. Bununla birlikte, #29 numaralı mil ile yapılan ölçümlerin hassasiyeti #21 numaralı mil ile yapılan ölçümlere kıyasla daha düşüktür. Bu çalışmada, geniş sıcaklık aralığında numunelerin viskozite davranışını incelemek amacıyla #29 numaralı mil ile RV deneyleri yürütülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde RET modifiyeli bitümün diğer numunelere kıyasla düşük sıcaklıklarda daha kıvamlı olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, RET+%8 bitkisel atık yağ ile modifiye edilmiş bitümün saf bitümün viskozite değerlerine yakın seviyede viskoziteye sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.19. #29 numaralı mil ile yürütülen RV deneylerine ait sonuçlar

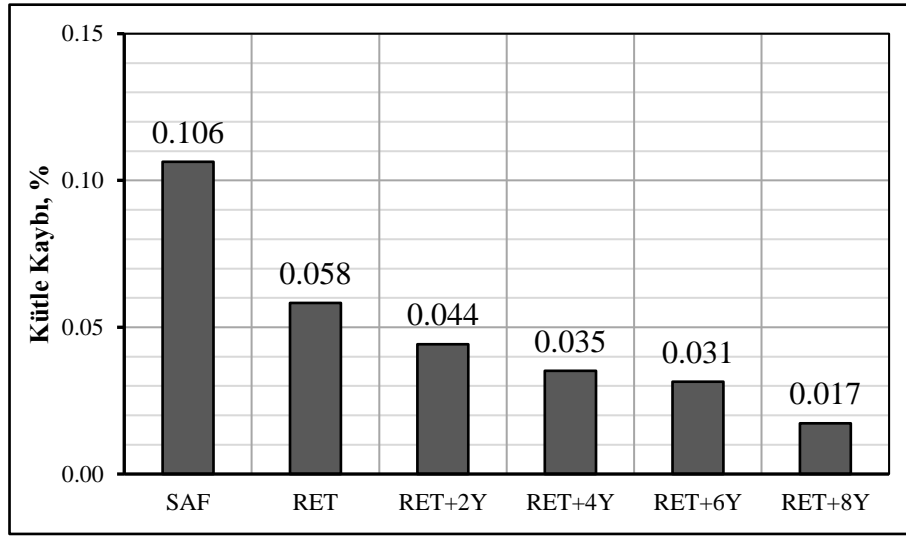


Şekil 4.20. #29 numaralı mil ile yürütülen RV deneylerine ait değerler (logaritmik eksen üzerinde)

4.2.2. RTFO Deneyi Sonuçları

Bitümün kısa dönemli yaşlandırılmasının temsil edildiği RTFO deneyinden elde edilen kütle kayıpları Şekil 4.21’de grafik halinde gösterilmiştir. Superpave sınıflandırmasında bitümün RTFO deneyi sonrası maksimum kütle kaybının %1 olması istenmektedir (ASTM D6373, 2021). Şekil 4.21 incelendiğinde hazırlanan tüm numunelerin şartname kriterini sağladığı görülmektedir. Bu durum, bitümün kısa dönemli yaşlanmadan sonra da işlenebilirliğini kaybetmeyeceği ve içyapısında kritik bozulmaların meydana gelmeyeceğini ifade etmektedir. Buna ilaveten, saf bitüme

RET ilavesiyle, saf bitüme kıyasla kütle kaybında %45.3'lük bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca, RET ile birlikte %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ kullanımı saf bitüme kıyasla kütle kaybında sırasıyla %58.5, %67, %70.8, %84 azalma sağlamıştır. Bu sonuçlardan yola çıkılarak, saf bitüme hem RET ilavesinin hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilavesinin saf bitümün kısa dönemli yaşlanmaya karşı direncini arttırdığını söylemek mümkündür. Ayrıca, artan bitkisel atık yağ oranına paralel olarak yaşlanma direncinde de bir artış meydana gelmiştir.



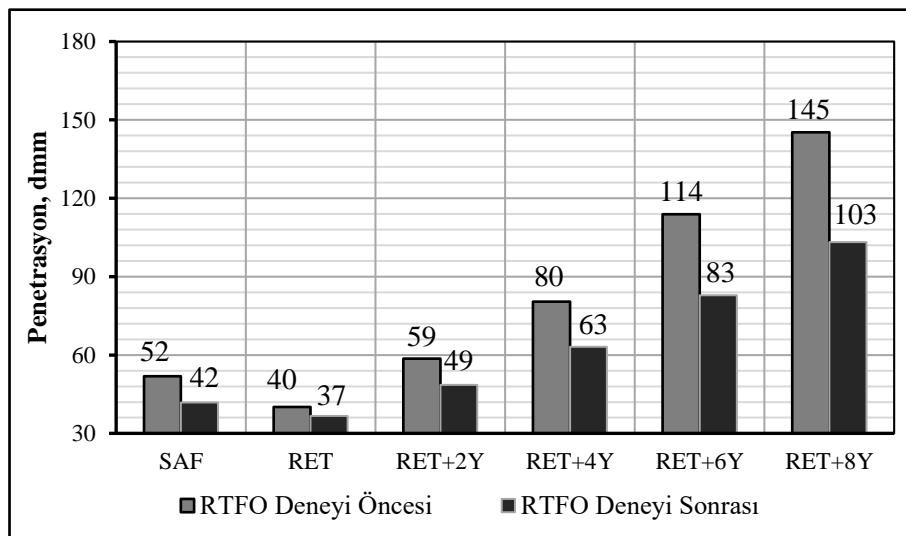
Şekil 4.21. RTFO deneyi sonrası kütle kayıpları

Bitümde kısa dönemli yaşlanmanın etkisini farklı yöntemlerle de incelemek mümkündür. Genellikle bu yöntemler, RTFO deneyine tabi tutulmuş (yaşlandırılmış) numunelere geleneksel ve/veya reolojik deneylerin uygulanması ve elde edilen sonuçların yaşlandırılmamış numunelere ait sonuçlarla kıyaslanmasıdır. Bu amaçla çoğunlukla, penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR deneylerinden faydalanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numunelere penetrasyon ve RV deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmış numunelere ait sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

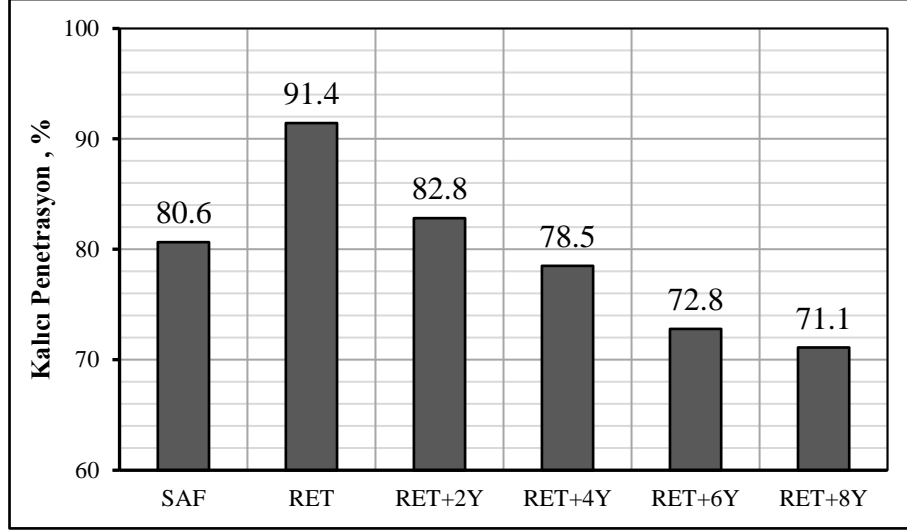
Tablo 4.3. RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numunelere yapılan deneyler ve sonuçları

Deneyler	SAF	RET	RET+2Y	RET+4Y	RET+6Y	RET+8Y
Penetrasyon (dmm)	41.8	36.6	48.5	63.1	82.9	103.3
Kalıcı penetrasyon (%)	80.6	91.4	82.8	78.5	72.8	71.1
Dönel viskozite @135°C	628	2150	1450	1152	933	808
Yaşlanma İndeksi	1.27	1.82	1.69	1.56	1.55	1.53

RTFO deneyi öncesinde ve sonrasında tüm numunelere penetrasyon deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de gösterilmiştir. RTFO deneyi sonrası penetrasyon değerleri kıyaslandığında sonucun RTFO deneyi öncesinde yapılan penetrasyon deneyi ile benzer şekilde olduğu anlaşılmıştır. Başka bir ifadeyle, RET ilaveli bitüm en düşük penetrasyon değerine sahipken en yüksek penetrasyon değeri RET+%8 bitkisel atık yağ ilaveli numunede gözlemlenmiştir. Penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlardan faydalanılarak, bitümlerin kısa dönemli yaşlanma sonrası penetrasyon değerlerinin yüzde kaçını muhafaza ettiğinin bir göstergesi olan kalıcı penetrasyon yüzdeleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.23’te grafik halinde verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde RET ilaveli bitümün penetrasyon değerini yüksek oranda koruduğu görülmektedir. Bununla ilaveten, RET ile birlikte bitkisel atık yağ kullanımının kalıcı penetrasyon oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Kalıcı penetrasyon yüzdesi fazla olan bitümlerin yaşlanma olayından daha az etkilendiği düşünülebilir. Bu durumda, kısa dönemli yaşlanmadan en az RET ilaveli bitüm etkilenirken en fazla RET+%8 bitkisel yağ ilaveli bitüm etkilenmektedir. Buna ilaveten, saf bitümün yaşlanmadan etkilenme performansının RET ve %2-4 bitkisel atık yağ ilaveli bitümlere benzer olduğunu söylemek mümkündür. Tüm bu bulgulara ek olarak, kalıcı penetrasyon yüzdesinin yaşlanma ile bağlantısının daha detaylı incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Çünkü yumuşak bitümlerin penetrasyon kaybı sert bitümlere kıyasla çok daha kolay gerçekleşmektedir. Bu durum, kalıcı penetrasyon sonuçlarını etkilemektedir.



Şekil 4.22. RTFO deneyi öncesi ve sonrasında numunelere ait penetrasyon değerleri

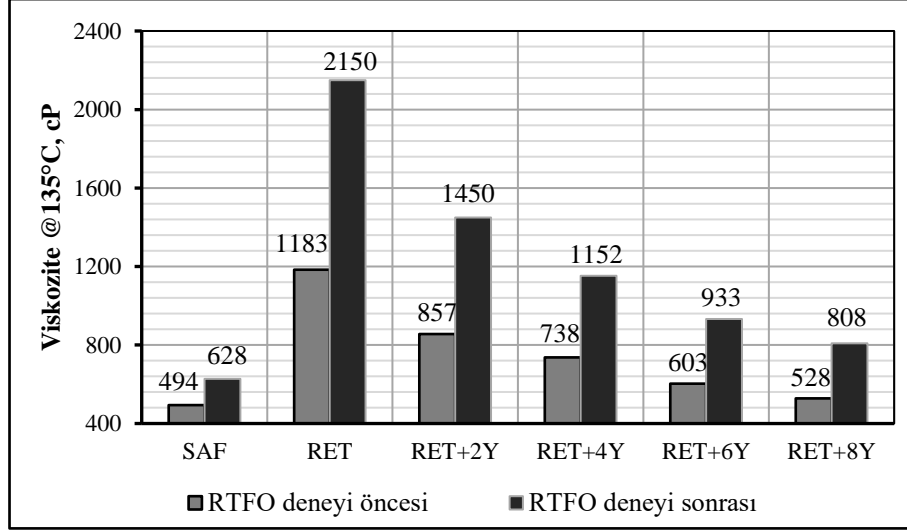


Şekil 4.23. Kalıcı penetrasyon yüzdeleri

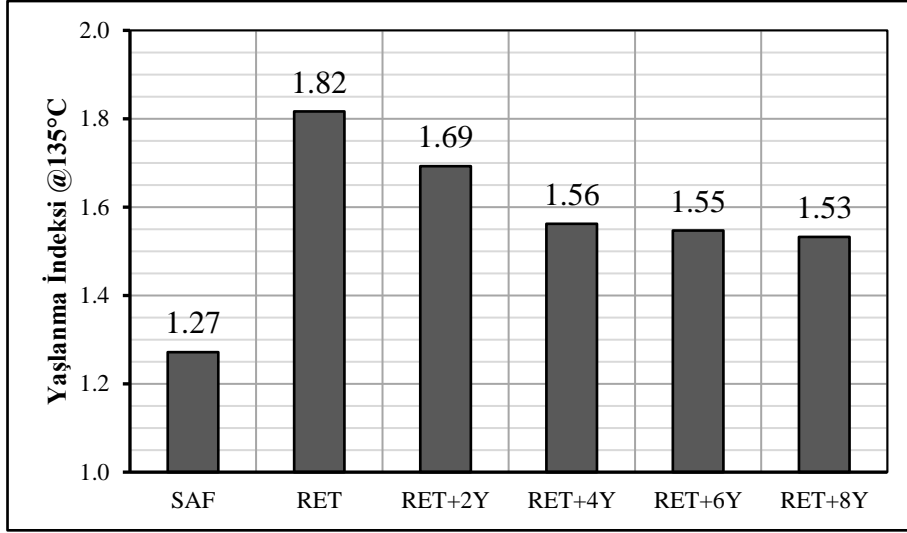
Bitüm numuneleri üzerinde kısa dönemli yaşlanmanın etkisini incelemeye farklı bir yöntem olarak RV deneyinden faydalanılmıştır. RTFO deneyi öncesi ve sonrasında numunelere RV deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.24'te grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, bitümlerin RTFO deneyi sonrasında viskozite değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu durum, bilindiği üzere, bitümlerin kısa dönemli yaşlanmadan sonra sertleştiklerinin ifade etmektedir. Yaşlanmanın etkisini belirlemek amacıyla aşağıdaki formül yardımıyla numunelere ait yaşlanma indeksleri belirlenmiştir:

$$\text{Yaşlanma İndeksi} = \frac{\text{RTFO deneyi sonrası viskozite (cP)}}{\text{RTFO deneyi öncesi viskozite (cP)}} \quad (4.2)$$

Şekil 4.25'te hesaplanan yaşlanma indeksleri grafik halinde verilmiştir. Yaşlanma indeksinin büyük olması bitüm numunesinin kısa dönemli yaşlanma olayından olumsuz anlamda etkilendiğini belirtmektedir. Şekil 4.25 incelendiğinde ise kısa dönemli yaşlanmadan en az saf bitümün en fazla ise RET modifiyeli bitümün etkilendiği anlaşılmaktadır. Buna ilaveten, RET + %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin yaşlanma indekslerinin RET modifiyeli bitüme kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, RET+bitkisel atık yağ modifikasyonunun RET modifikasyonuna kıyasla daha iyi bir yaşlanma direncine sahip olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.24. RTFO deneyi öncesi ve sonrası 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri



Şekil 4.25. 135°C sıcaklıkta yürütülen RV deneyleri sonucunda elde edilen yaşlanma indeksleri

Numuneler üzerinde kısa dönemli yaşlanmanın etkisini incelemek için elde edilen sonuçlar toparlandığında incelenen yönteme göre numunelerin yaşlanma direnci performanslarının değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Kütle kaybı yüzdesi dikkate alındığında en yüksek yaşlanma direnci RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm numunesinde, en düşük yaşlanma direnci saf bitüm numunesinde çıkmıştır. Kalıcı penetrasyon yüzdeleri dikkate alındığında en yüksek yaşlanma direnci RET modifiyeli bitüm numunesinde, en düşük yaşlanma direnci RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm numunesinde gözlemlenmiştir. Son olarak yaşlanma indeksleri dikkate alındığında ise, en yüksek yaşlanma direnci saf bitüm numunesinde, en düşük yaşlanma direnci RET modifiyeli bitüm numunesinde gözlemlenmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere değerlendirmeler sonrası ciddi performans farklılıkları meydana

gelmiştir. Bu durum, yöntemlerin yaşlanma direnci ile ilgili genel geçerliliğinin daha detaylı incelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

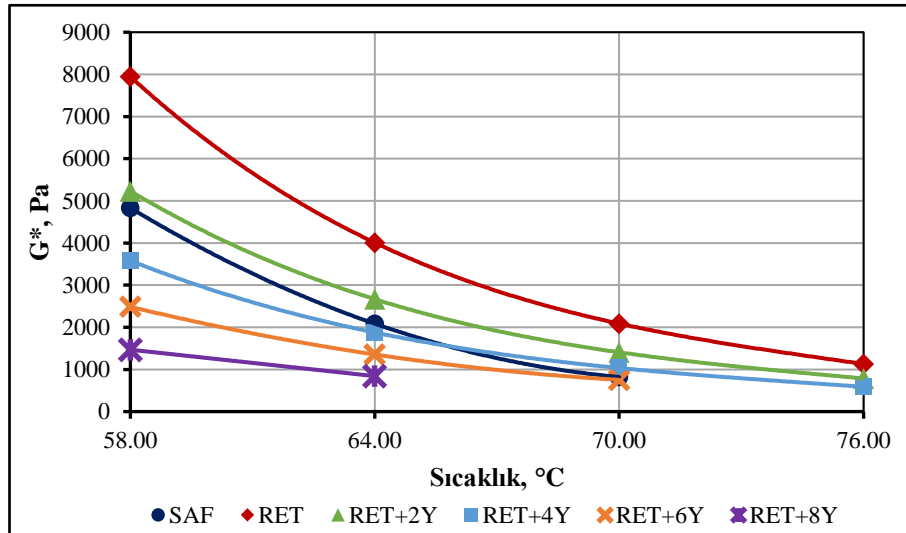
Bu çalışmada yaşlanma etkisinin değerlendirilmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan ve büyük bir kesim tarafından kabul görmüş RTFO deneyi sonrası kütle kaybı sonuçları dikkate alınmıştır. Bu doğrultta, saf bitüme RET ilavesinin saf bitüme kıyasla yaşlanma direncini arttırdığı görülmüştür. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesinin de RET modifiyeli bitüme kıyasla yaşlanma direncini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, ilave edilen bitkisel atık yağ miktarındaki artışa paralel olarak yaşlanma direnci de artmıştır.

4.2.3. DSR Deneyi Sonuçları

Hazırlanan modifiyeli bitümlere kontrollü gerilme (120 Pa) koşulu altında, 25 mm çaplı paralel plaklar kullanılarak, 10 rad/s (1.59 Hz) frekansta, 58°C, 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanmıştır. Deney sonrasında her bir numuneye ait G' , G'' , G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ parametreleri belirlenmiş ve Tablo 4.4'te belirlenen bu değerler verilmiştir. Buna ilaveten, G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ parametrelerine ait grafikler çizdirilmiş ve sırasıyla Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de bu grafikler gösterilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda DSR deneyi yürütülürken öncelikle, 58°C sıcaklıkta ölçümlere başlanmıştır. Her numune için $G^*/\sin\delta$ değeri kontrol edilerek bir sonraki sıcaklığa geçilip geçilmeyeceğine karar verilmiştir. Superpave performans derecelendirmesine göre (ASTM D6373, 2021) bir üst sıcaklık, önceki sıcaklıktan 6°C fazladır ve bu sıcaklığa geçmek için yapılan DSR deneyi sonucunda numuneye ait $G^*/\sin\delta$ değerinin şartname sınır olan 1000 Pa'ın altına düşmemesi gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak deneyler yürütülmüştür. Dolayısıyla, Tablo 4.4'te eksi (-) işareti ile gösterilen kısımlar ilgili sıcaklık için belirtilen numunenin bir önceki sıcaklıkta şartname sınırını hali hazırda sağlamadığını ve ilgili sıcaklıkta deneyin yürütülmediğini ifade etmektedir. Buna ilaveten, Tablo 4.4'te 76°C sıcaklıkta RET modifiyeli bitümün 1000 Pa'lık şartname sınırının altına düşmediği ve buna rağmen 82°C için deney yapılmadığı anlaşılmaktadır. Bu sıcaklıkta deney yapılması halinde, 76°C sıcaklıkta elde edilen sonucun 1000 Pa'a çok yakın çıkmasından yola çıkılarak, numunenin $G^*/\sin\delta$ değerinin 1000 Pa'dan yüksek çıkma ihtimalinin olmadığı düşünülmüştür. Bu sebeple, 82°C'de RET modifiyeli bitüme DSR deneyi uygulanmamıştır.

Tablo 4.4. DSR deneyi sonuçları

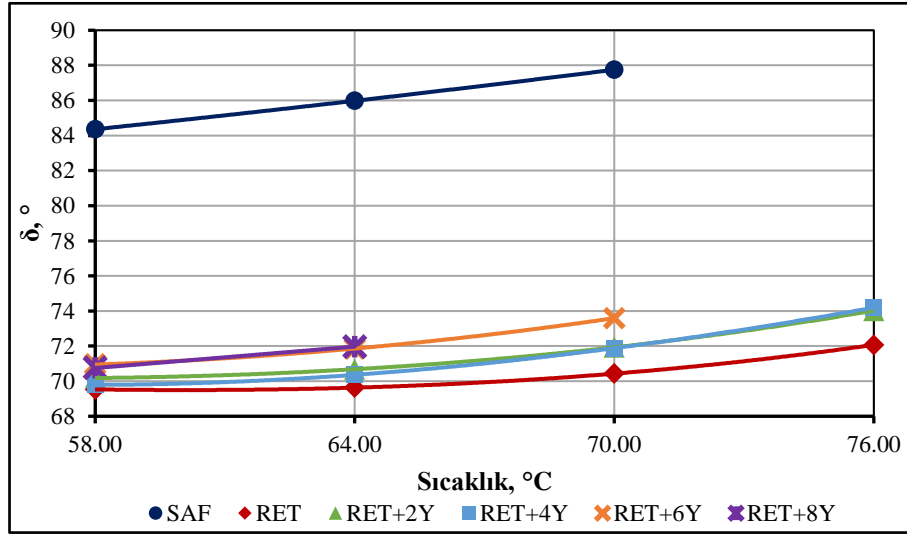
Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (ASTM D6373)
SAF	58	474.78	4807.61	4831	84.36	4854.50	1000
	64	146.17	2079.87	2085	85.98	2090.14	minimum
	70	32.24	820.57	821	87.75	821.83	
	76	-	-	-	-	-	
RET	58	2779.20	7445.19	7947	69.53	8482.63	
	64	1394.76	3756.42	4007	69.63	4274.30	
	70	699.06	1966.44	2087	70.43	2214.95	
	76	347.57	1074.17	1129	72.07	1186.63	
RET+2Y	58	1773.66	4921.13	5231	70.18	5560.38	
	64	882.03	2515.87	2666	70.68	2825.09	
	70	436.42	1337.60	1407	71.93	1480.00	
	76	216.50	756.01	786	74.02	818.01	
RET+4Y	58	1237.10	3360.53	3581	69.79	3815.94	
	64	630.88	1767.80	1877	70.36	1992.94	
	70	321.58	982.72	1034	71.88	1087.95	
	76	160.17	565.66	588	74.19	611.01	
RET+6Y	58	811.74	2350.80	2487	70.95	2631.09	
	64	421.87	1287.65	1355	71.86	1425.87	
	70	212.90	722.90	754	73.59	785.60	
	76	-	-	-	-	-	
RET+8Y	58	483.99	1385.92	1468	70.75	1554.94	
	64	260.52	800.37	842	71.97	885.17	
	70	-	-	-	-	-	
	76	-	-	-	-	-	



Şekil 4.26. Kompleks kayma modülleri (G*)

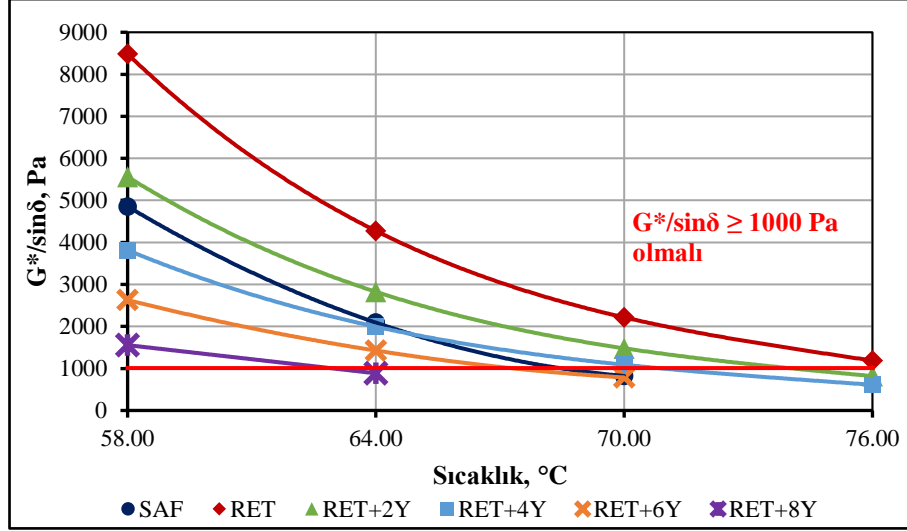
Bitümlerin sertliği ile ilgili bilgi sağlayan G* değerlerinin gösterildiği Şekil 4.26 incelendiğinde tüm sıcaklıklarda en yüksek G* değerine RET modifiyeli bitümün, en düşük G* değerine RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün sahip olduğu

görülmektedir. Bu durum, RET modifiyeli bitümün en rijit yapıda olduğunu, RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün ise en düşük rijitliğe sahip olduğunu belirtmektedir. Buna ilaveten, saf bitümün G^* değerinin 58°C ve 64°C sıcaklıklarda RET+%2 ve RET+%4 bitkisel atık yağ ilaveli numuneler arasında kaldığı, 70 °C sıcaklıkta ise bu RET+%4 ve RET+%6 bitkisel atık yağ ilaveli numuneler arasında kaldığı görülmektedir. Bu durum ise saf bitümü sıcaklık artmasıyla diğer bitüm numunelerine kıyasla rijitliğini daha hızlı kaybettiğini ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle, saf bitüm diğer bitümlere kıyasla sıcaklık değişiminden daha çok etkilenmektedir ve bu sonuç penetrasyon indeksleri ile benzer şekilde saf bitümün ısı duyarlılığının yüksek olduğunu göstermektedir.



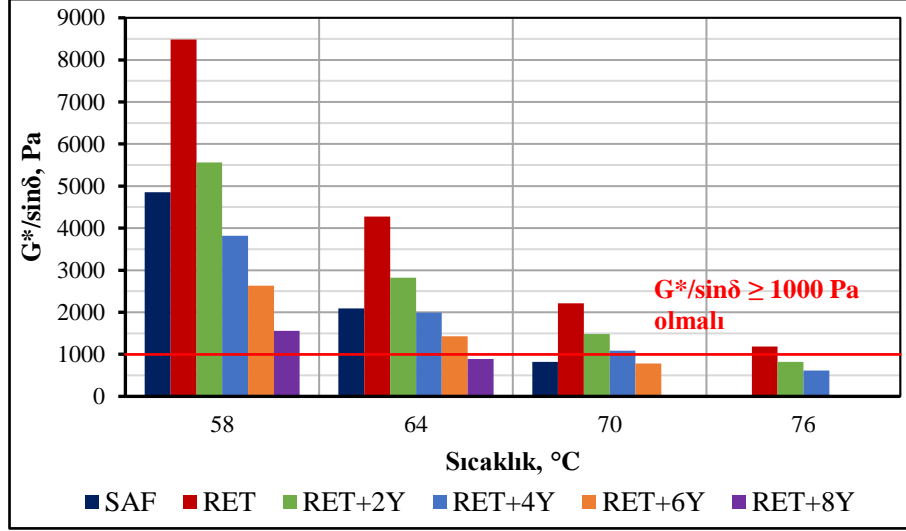
Şekil 4.27. Faz açıları (°)

Numunelerin elastiklikleri hakkında bilgi veren faz açılarının (δ) gösterildiği Şekil 4.27 incelendiğinde DSR deneyinin yürütüldüğü tüm sıcaklıklarda saf bitümün en yüksek δ değerine sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum, modifiyeli bitümlerin saf bitüme göre daha elastik bir yapıda olduğunu saf bitümün ise bünyesinde viskoz malzeme özelliklerini baskın bir şekilde gösterdiğini ifade etmektedir. Bu sonuçlara ilaveten, tüm sıcaklıklar için en düşük faz açısına (en yüksek elastikliğe) sahip olan numune RET modifiyeli bitümdür. Ayrıca, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesi, faz açısında 3-4°'lik bir artışa sebep olmuştur. RET modifiyeli bitüm ile saf bitüm arasındaki yaklaşık 16°'lik fark göz önüne alındığında RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin sebep olduğu faz açısındaki artışın, RET modifiyeli bitümün elastik özelliğinde önemli bir kayba sebebiyet vermediği düşünülebilir.



Şekil 4.28. Tekerlek izi parametreleri ($G^*/\sin\delta$)

$G^*/\sin\delta$, tekerlek izi parametresi, Superpave şartnamesinde bitümlerin kullanılacakları asfalt kaplamanın tekerlek izine karşı direncinin bir ifadesidir. Bu çalışmada hazırlanan modifiyeli bitümlerin tekerlek izi parametreleri Şekil 4.28’de grafik halinde verilmiştir. Bu grafikte, 58°C, 64°C, 70°C ve 76°C sıcaklıklarda yürütülen deneylerin sonucunda elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, en küçük $G^*/\sin\delta$ değerlerine RET+%8 bitkisel atık yağ ile modifiye edilen bitümün, en büyük $G^*/\sin\delta$ değerlerine ise sadece RET ile modifiye edilen bitümün sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, tekerlek izine karşı en yüksek dirençli kaplamanın RET ile modifiyeli bitüm kullanılarak, en düşük dirençli kaplamanın ise RET+%8 bitkisel atık yağ ile modifiye edilmiş bitüm kullanılarak inşa edilebileceğini ifade etmektedir. Bu sonuca ilaveten, saf bitümün tekerlek izi direnci diğer bitüm numuneleri ile kıyaslandığında, 58°C ve 64°C sıcaklıklarda saf bitümün $G^*/\sin\delta$ değerinin RET+%2 ve RET+%4 bitkisel atık yağ ile modifiye edilen bitümler arasında kaldığı görülmektedir. Ancak, 70°C sıcaklıkta ise bu değer RET+%4 ve RET+%6 bitkisel atık yağ ile modifiye edilen bitümler arasında kaldığı görülmektedir. İfade edilen bu husus, sıcaklıklara göre her bir numunenin $G^*/\sin\delta$ değerlerinin ayrı grafiklerde verildiği Şekil 4.29’da daha net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, penetrasyon indeksi sonuçlarına benzer şekilde saf bitümün ısı duyarlılığının diğer modifiyeli bitümlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, sıcaklık artışından diğer numunelere kıyasla daha fazla olumsuz yönde etkilenmektedir.



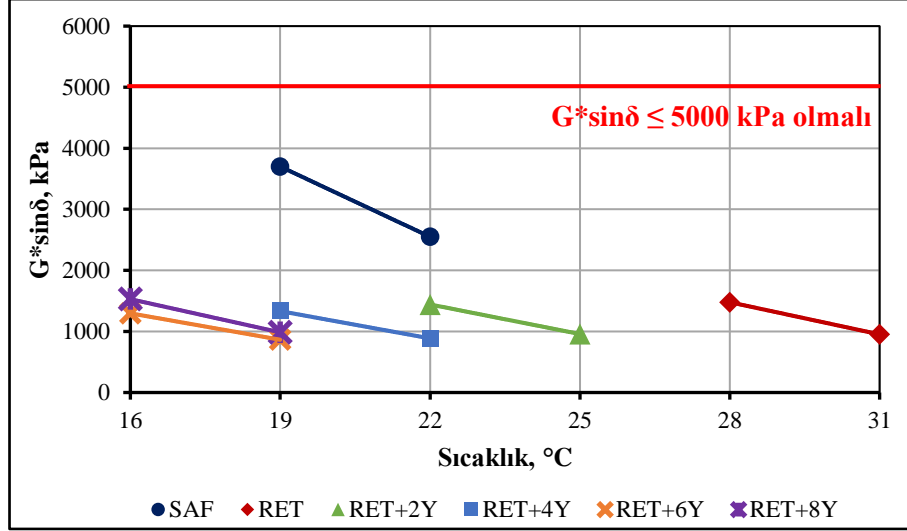
Şekil 4.29. Sütun grafiğinde gösterilmiş tekerlek izi parametreleri

Tekerlek izi dirençleri ile ilgili olarak genel bir çıkarım yapılacak olursa saf bitüme RET ilave edilmesinin saf bitüme kıyasla tekerlek izi direncini arttırdığı görülmektedir. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesi, artan yağ oranıyla ters orantılı olarak, RET modifiyeli bitüme kıyasla tekerlek izi direncinde bir düşüşe sebebiyet vermektedir.

Superpave şartnamesinde DSR deneyi ile ilgili bir diğer kriter olarak PAV ile yaşlandırılmış bitüm numunelerinin ortalama sıcaklıklardaki $G^*/\sin\delta$ değerlerinin 5000 kPa'ı aşmamasını istenmektedir (ASTM D6373, 2021). Deneyin yürütüleceği sıcaklık numunenin yüksek sıcaklık performans sınıfı dikkate alınarak şartnamedeki tablodan seçilir (ASTM D6373, 2021). Bu doğrultuda, PAV ile yaşlandırılmış numunelere ortalama sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmış ve bu deneylere ait sonuçlar Tablo 4.5 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir.

Tablo 4.5. PAV ile yaşlandırılmış numunelere ait $G^*/\sin\delta$ değerleri

Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	Şartname Limiti
SAF	19	3700	5000 kPa maksimum
	22	2550	
RET	28	1479	(ASTM D6373)
	31	952	
RET+2Y	22	1442	
	25	958	
RET+4Y	19	1333	
	22	886	
RET+6Y	16	1297	
	19	864	
RET+8Y	16	1529	
	19	985	



Şekil 4.30. PAV ile yaşlandırılmış numunelere ait $G^*sin\delta$ değerleri

Şekil 4.30 incelendiğinde hazırlanan tüm numunelerin şartname üst limiti olan 5000 kPa'dan daha düşük $G^*sin\delta$ değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum hazırlanmış olan modifiyeli bitümlerle inşa edilecek asfalt kaplamaların yorulma problemi ile karşı karşıya kalmayacakları anlamına gelmektedir. Buna ilaveten, saf bitüme kıyasla hem RET modifiyeli hem de RET+bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin yorulma dayanımlarının daha yüksek olduğu ifade edilebilir.

4.2.4. BBR Deneyi Sonuçları

Hazırlanan numunelere PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırma uygulandıktan sonra numunelerin düşük sıcaklıklardaki çatlakların oluşumuna karşı direncini belirlemek amacıyla BBR deneyi uygulanmıştır. Deney sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 4.6'da verilmiştir. Buna ilaveten, numunelerin sünme rijitlikleri Şekil 4.31'de, sünme oranları ise Şekil 4.32'de ayrı ayrı grafik halinde sunulmuştur.

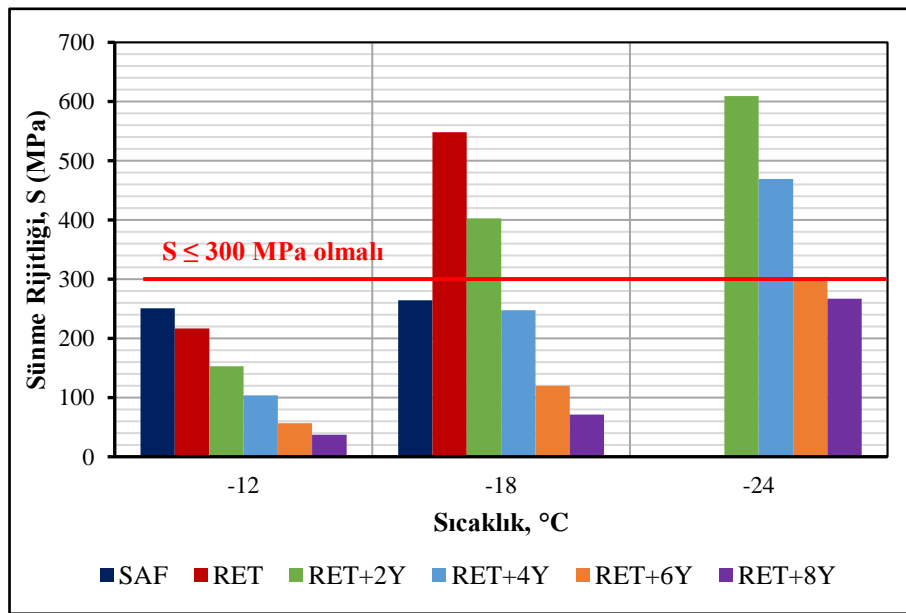
BBR deneyinde, deneye tabi tutulan bitümün kullanılacağı kaplamanın çatlama göstermeden hizmet vereceği en düşük sıcaklık belirlenmeye çalışılmaktadır. Numune, bu sıcaklık değerinin 10°C yukarısında deneye tabi tutularak sünme rijitliğinin 300 MPa'dan küçük, sünme oranının ise 0.300'den büyük olması beklenmektedir (ASTM D6373, 2021). Bu iki koşulu da sağlayan numunenin kullanılacağı kaplamanın, deneyin yürütüldüğü sıcaklığın 10°C aşağısında çatlama göstermeden hizmet verebileceği kabul edilmektedir. Örneğin, -12°C 'de yürütülen bir deneyde numunenin her iki koşulu da sağladığı düşünülürse bu durum, deneye tabi

tutulan numune ile inşa edilen kaplamanın, -22°C'lik sıcaklıkta çatlama göstermeden hizmet verebileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 4.6. BBR deneyi sonuçları

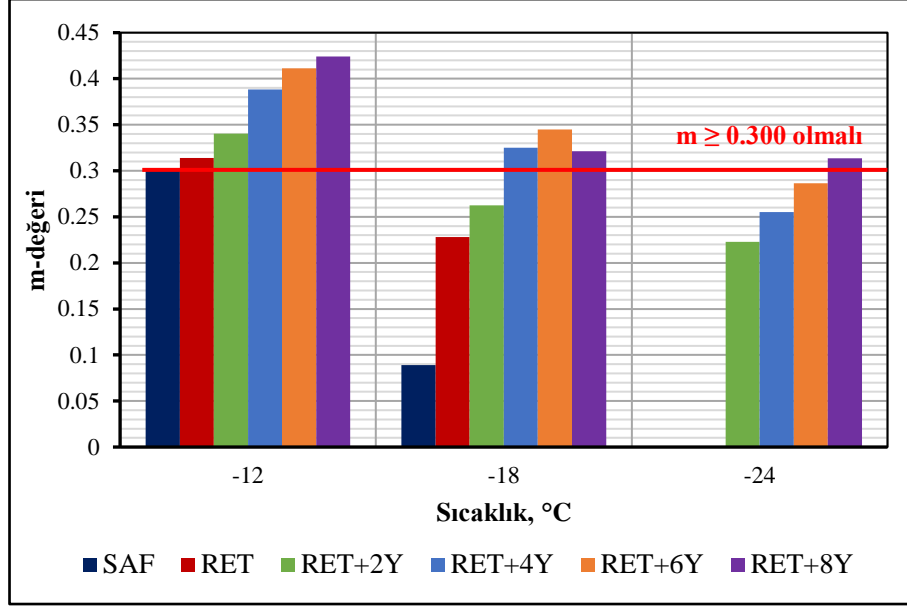
Numune Kodu	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği, S (MPa) ≤ 300 olmalı	Sünme Oranı (m-değeri), m ≥ 0.300 olmalı
SAF	-12	250.76	0.3
	-18	264.22	0.089
	-24	-	-
RET	-12	216.67	0.314
	-18	548.45	0.228
	-24	-	-
RET+2Y	-12	152.89	0.3404
	-18	402.56	0.2626
	-24	609.1	0.2227
RET+4Y	-12	103.59	0.3884
	-18	247.37	0.3252
	-24	469.14	0.2552
RET+6Y	-12	56.4	0.4112
	-18	119.69	0.345
	-24	303.98	0.2864
RET+8Y	-12	37.03	0.424
	-18	71.18	0.3213
	-24	266.98	0.3135

BBR deneyleri öncelikle -12°C'lik sıcaklıkta yürütülmüştür. Yukarıda ifade edilen her iki koşulu da sağlayan numuneler şartname doğrultusunda 6°C daha düşük bir sonraki sıcaklıkta deneye tabi tutulmuşlardır. Şartnamenin iki koşulundan herhangi birini sağlamayan numune, bir sonraki sıcaklıkta deneye tabi tutulmamıştır.



Şekil 4.31. Sünme rijitlikleri

Numunelere ait sünme rijitliklerinin verildiği Şekil 4.31 incelendiğinde -12°C sıcaklıkta tüm numunelerin 300 MPa şartname üst limitinin altında kaldığı görülmektedir. Bu sıcaklık için RET modifiyeli bitümün sünme rijitliğinin, saf bitüme kıyasla %13.6 daha düşük olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitüme %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ ilave edilerek oluşturulan kompozit modifiyeli bitümlerin sünme rijitlikleri ise RET modifiyeli bitüme kıyasla sırasıyla %29.4, %52.2, %74, %82.9 daha düşüktür. Bu durum, -12°C 'lik deney sıcaklığında saf bitüme hem RET ilavesinin hem de RET+bitkisel atık yağ ilavesinin saf bitümün çatlama direncini arttırdığını göstermektedir. Şekil 4.31'de -18°C sıcaklıktaki sonuçlar incelendiğine RET modifiyeli ve RET+%2 yağ modifiyeli bitümlerin şartname üst limitini aştığı görülmektedir. Bu sıcaklık için RET modifiyeli bitümün sünme rijitliğinin, saf bitüme kıyasla %107.6 daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitüme %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ ilave edilerek oluşturulan kompozit modifiyeli bitümlerin sünme rijitlikleri ise RET modifiyeli bitüme kıyasla, sırasıyla %26.6, %54.9, %78.2, %78.2 daha düşüktür. Bu durum, -18°C 'lik deney sıcaklığında saf bitüme RET ilavesinin saf bitümün çatlama direncini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin RET modifiyeli bitümün çatlama direncini arttırdığını göstermektedir. Buna ilaveten, -18°C 'lik deney sıcaklığında, saf bitümün sünme rijitlikleri ile RET+bitkisel atık yağ modifiyeli bitümler kıyaslandığında saf bitüme ait değerler RET+%2 ve RET+%4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümler arasında kaldığı ve RET+%4'e daha yakın olduğu anlaşılmaktadır. Son olarak, -24°C sıcaklıktaki değerler incelendiğinde ise sadece RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün şartname üst limiti altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.32. Sünme oranları (m-değerleri)

Numunelere ait sünme oranlarının gösterildiği Şekil 4.32 incelendiğinde -12°C'lik deney sıcaklığında tüm numunelerin şartname alt limiti olan 0.300 değerinin üstünde kaldığı görülmektedir. Buna ilaveten, -18°C'lik deney sıcaklığında şartname alt limiti üstünde RET+%4, %6, %8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümler kalmıştır. Son olarak, -24°C'lik deney sıcaklığında ise sadece RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm şartname kriterini sağlamıştır.

Genel olarak BBR deneyi sonuçlarına göre modifikasyon etkisi özetlenecek olursa, saf bitüme RET ilavesi, saf bitümün düşük sıcaklık direncini azaltırken, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesi, RET modifiyeli bitüme kıyasla düşük sıcaklık direncinde bir artış sağlamaktadır.

4.2.5. Performans Sınıflandırmaları

Bitümlerin performans sınıflandırmaları Superpave şartnamesine göre 6°C sıcaklık aralıkları ile gerçekleştirilmektedir. Genel olarak kritik şartname sınırları aşağıdaki gibi özetlenebilir (ASTM D6373, 2021):

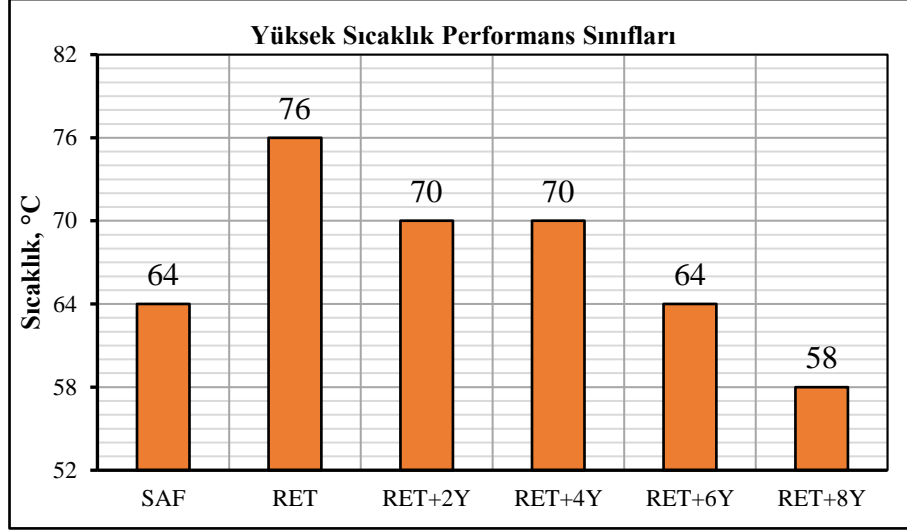
- Yüksek sıcaklıklarda,
 - yaşlandırılmamış numunenin $G^*/\sin\delta$ değerinin en az 1000 Pa olması,
 - RTFO deneyi ile yaşlandırılmış numunenin $G^*/\sin\delta$ değerinin en az 2200 Pa olması
- Ortalama sıcaklıklarda,

- PAV ile yaşlandırılmış numunenin $G^* \sin \delta$ değerinin en fazla 5000 kPa olması,
- Düşük sıcaklıklarda,
 - PAV ile yaşlandırılmış numunenin S değerinin en fazla 300 MPa olması,
 - PAV ile yaşlandırılmış numunenin m-değerinin en az 0.300 olması, gerekmektedir.

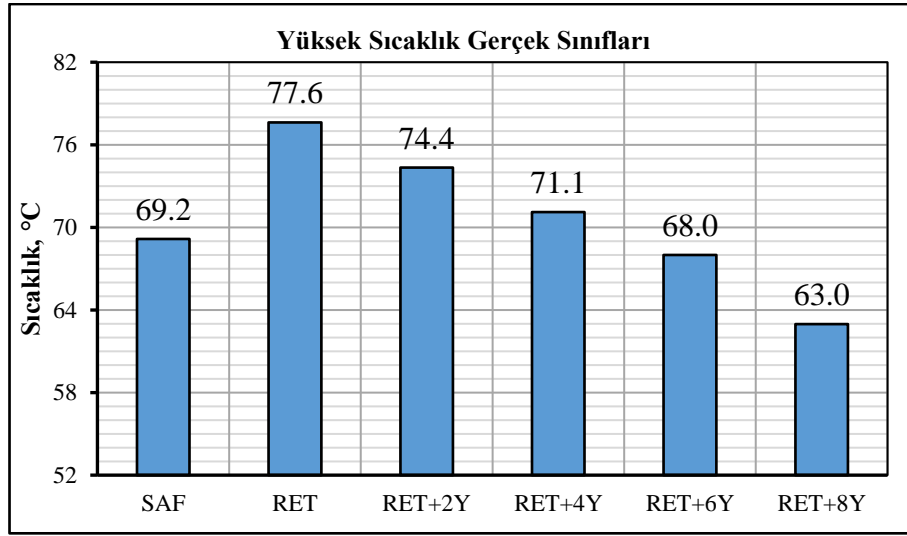
Numunenin yukarıda ifade edilen şartladığı sağladığı sıcaklıklar, numuneye ait performans sınıfını belirtmektedir. Numunelerin yüksek sıcaklık performansını belirlemede DSR deneyi, düşük sıcaklık performansını belirlemede ise BBR deneyi kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında DSR deneyi sonucunda hazırlanan numunelere ait yüksek sıcaklık performans sınıfları belirlenmiş ve Tablo 4.7’de ve Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Buna ilaveten, bitümlerin şartname değerini sağladığı net sıcaklıklar belirlenmiş ve numuneye ait yüksek sıcaklık gerçek sınıfı olarak ifade edilmiştir. Gerçek sınıf değerinin performans sınıfı değerinden farkı, 6°C’lik sıcaklık aralıklarıyla belirlenmeyip net değerlerin kullanılmasıdır. Çalışmada kullanılan numunelere ait yüksek sıcaklıklardaki gerçek sınıf değerleri de Tablo 4.7 ve Şekil 4.34’te gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Numunelere ait yüksek sıcaklıktaki performans sınıfları ve gerçek sınıflar

Numune Kodu	Yüksek Sıcaklık Performans Sınıfı	Yüksek Sıcaklık Gerçek Sınıfı
SAF	PG 64-XX	PG 69.2-XX
RET	PG 76-XX	PG 77.6-XX
RET+2Y	PG 70-XX	PG 74.4-XX
RET+4Y	PG 70-XX	PG 71.1-XX
RET+6Y	PG 64-XX	PG 68.0-XX
RET+8Y	PG 58-XX	PG 63.0-XX



Şekil 4.33. Yüksek sıcaklık performans sınıfları



Şekil 4.34. Yüksek sıcaklık gerçek sınıfları

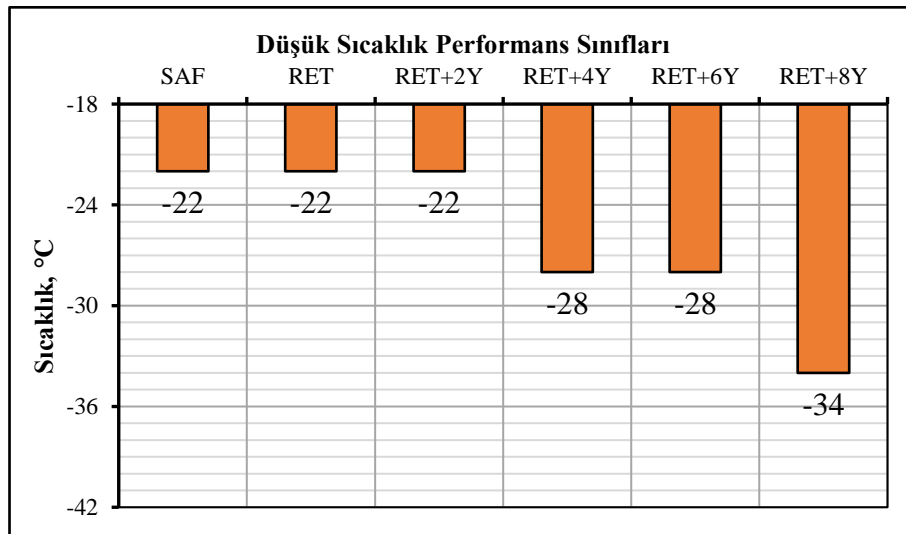
Şekil 4.33 incelendiğinde saf bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfının 64°C, RET modifiyeli bitümün 76°C, RET+%2 ve %4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin 70°C, RET+%6 atık yağ modifiyeli bitümün 64°C ve RET+%8 atık yağ modifiyeli bitümün 58°C olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık performans sınıfları dikkate alındığında RET+%2 ve %4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin aynı sınıfta yer aldıkları görülmektedir. Ancak, Şekil 4.34'te gösterilen yüksek sıcaklık gerçek sınıfları dikkate alındığında, bu numunelerin sırasıyla 74.1°C ve 71.1°C'lik yüksek sıcaklık gerçek sınıflarına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklık gerçek sınıfları kullanılarak yapılacak kıyaslamaların daha gerçekçi olacağını göstermektedir.

Yüksek sıcaklık gerçek sınıflarına göre, saf bitüme RET ilavesinin, saf bitümün gerçek sıcaklık sınıfını 69.2°C'den 77.6°C'ye çıkarttığı görülmektedir. Bu durum, RET modifiyeli bitüm ile inşa edilecek kaplamanın saf bitüm ile inşa edilecek kaplamaya kıyasla daha üstün bir tekerlek izi performansı sergileyeceğini ifade etmektedir. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitüme %2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ ilavesiyle RET modifiyeli bitümün gerçek sıcaklık sınıfının 77.6°C'den sırasıyla, 74.4°C, 71°C, 68°C, 63°C'ye düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durum RET+bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin RET modifiyeli bitüme kıyasla daha düşük tekerlek izine sahip olduğunun bir göstergesidir. Bununla birlikte, RET+%2 ve %4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin saf bitüme kıyasla daha yüksek gerçek sıcaklık sınıfına sahip olduğu da ortadadır.

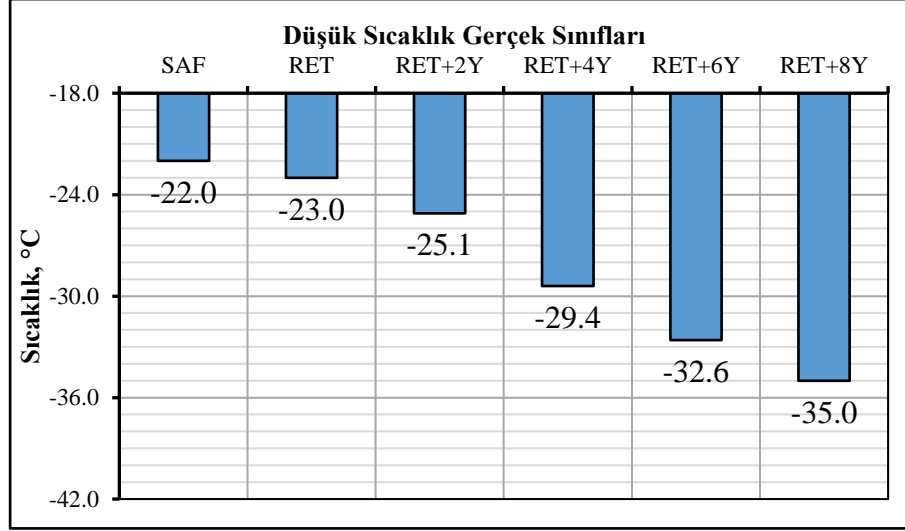
Bu çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin BBR deneyi ile belirlenen düşük sıcaklık performans sınıfları Tablo 4.8 ve Şekil 4.35'te belirtilmiştir. Buna ilaveten, numunelere ait düşük sıcaklık gerçek sınıfları da belirlenmiş ve Tablo 4.8 ile Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Numunelere ait düşük sıcaklıktaki performans sınıfları ve gerçek sınıflar

Numune Kodu	Düşük Sıcaklık Performans Sınıfı	Düşük Sıcaklık Gerçek Sınıfı
SAF	PG XX-22	PG XX-22.0
PMB	PG XX-22	PG XX-23.0
PMB+2Y	PG XX-22	PG XX-25.1
PMB+4Y	PG XX-28	PG XX-29.1
PMB+6Y	PG XX-28	PG XX-32.6
PMB+8Y	PG XX-34	PG XX-35.0



Şekil 4.35. Düşük sıcaklık performans sınıfları



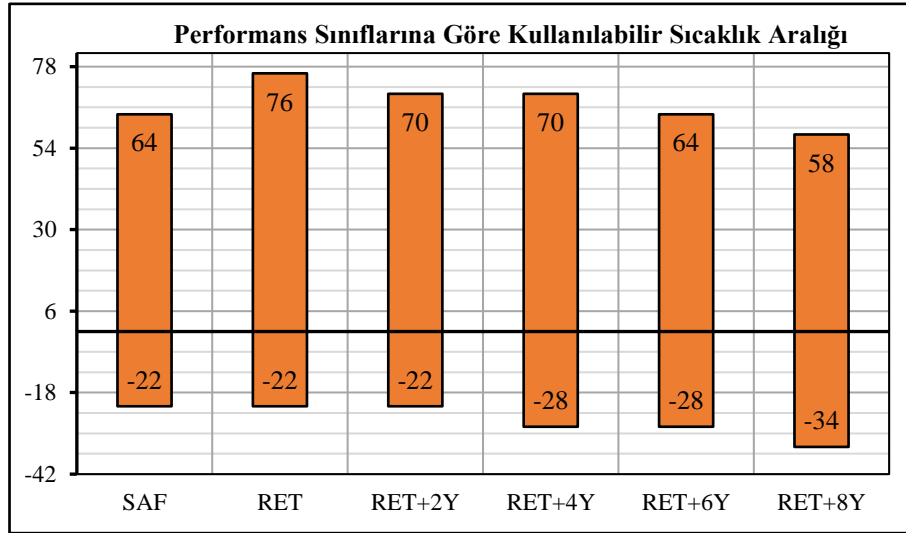
Şekil 4.36. Düşük sıcaklık gerçek sınıfları

Şekil 4.35 incelendiğinde saf bitümün, RET modifiyeli bitümün ve RET+%2 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün düşük sıcaklık performans sınıflarının -22°C , RET+%4 ve %6 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin -28°C ve RET+%8 atık yağ modifiyeli bitümün -34°C olduğu görülmektedir. Düşük sıcaklık gerçek sınıflarının gösterildiği Şekil 4.36 incelendiğinde, saf bitüme RET ilave edildiğinde saf bitümün düşük sıcaklık gerçek sınıfının -22°C 'den -23°C 'ye düştüğü görülmektedir. Bu durum, RET modifikasyonun saf bitümün düşük sıcaklıklardaki performansında önemli bir artış sağlamadığını, bununla birlikte, olumsuz bir etkisinin de olmadığını göstermektedir. RET+%2, %4, %6 ve %8 bitkisel atık yağ modifikasyonu ise saf bitümün -22°C olan düşük sıcaklık gerçek sınıfını sırasıyla, -25.1°C , -29.4°C , -32.6°C , -35°C 'ye düşürmüştür. Bu durum, saf ve RET modifiyeli bitümün düşük sıcaklık performansı üzerinde bitkisel atık yağ modifikasyonun sağladığı katkıyı açık bir şekilde gözler önüne sermektedir.

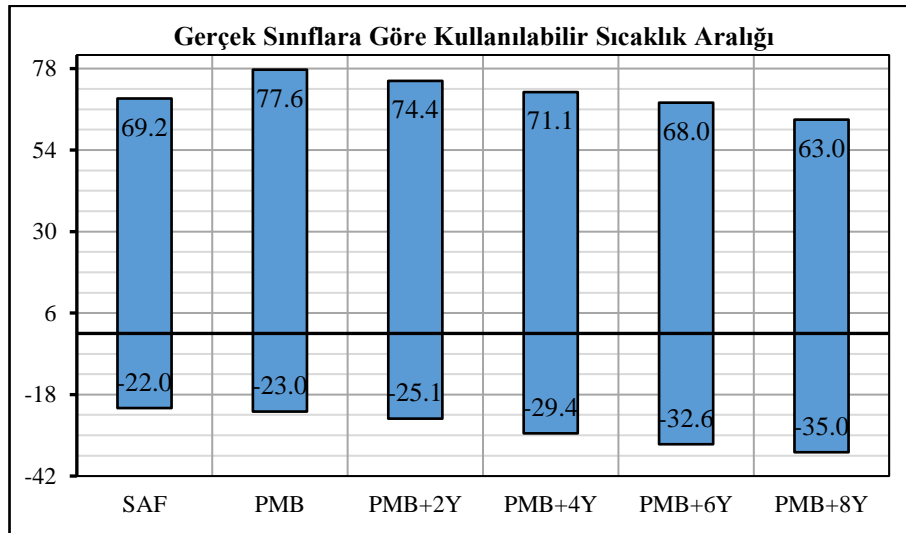
Bitümlere ait hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki performans sınıfları dikkate alınarak bu bitümler ile inşa edilecek kaplamaların hizmet verebilecekleri sıcaklık aralığı belirlenir. Superpave şartnamesinde bitümlerin sınıflandırılmasında bu sıcaklık aralığı kullanılmaktadır ve bu sıcaklık aralığı performans sınıfı (*performance grade, PG*) olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada hazırlana numunelere ait performans sınıfları ve gerçek sınıflar (*true grade*) Tablo 4.9, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Performans sınıfları ve gerçek sınıflar

Numune Kodu	Performans Sınıfı	Gerçek Sınıf
SAF	PG 64-22	PG 69.2-22.0
PMB	PG 76-22	PG 77.6-23.0
PMB+2Y	PG 70-22	PG 74.4-25.1
PMB+4Y	PG 70-28	PG 71.1-29.1
PMB+6Y	PG 64-28	PG 68.0-32.6
PMB+8Y	PG 58-34	PG 63.0-35.0



Şekil 4.37. Performans sınıfı aralıkları

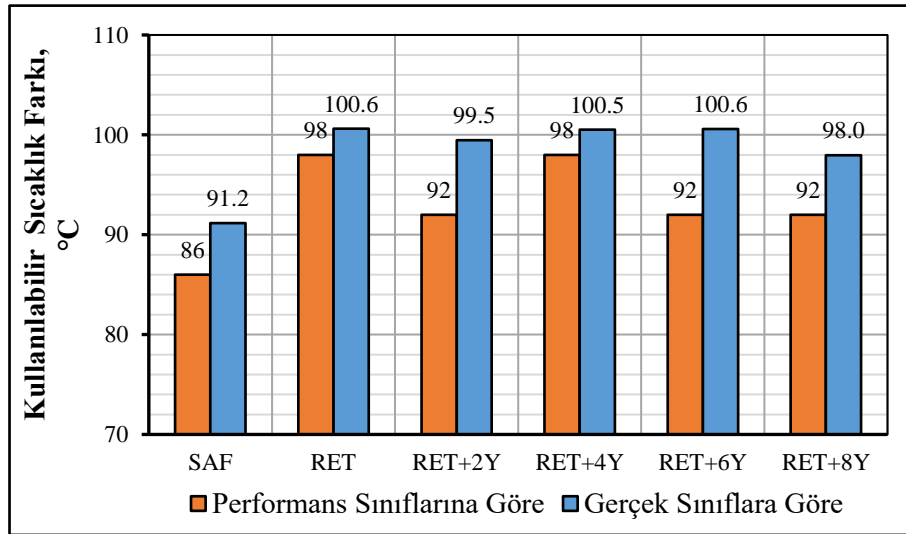


Şekil 4.38. Gerçek sınıf aralıkları

Şekil 4.38’de gerçek sınıflara dair kullanılabilir sıcaklık aralıkları incelenirse numunelerin birbirleri ile kıyaslanmasının daha önce ifade edildiği üzere daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda Şekil 4.38 incelendiğinde, saf bitüme RET ilavesi ile saf bitümün yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirlik sınırının arttığı

görülmektedir. RET modifiyeli bitüme, bitkisel atık yağ ilavesi ile kullanılabilirlik üst sınırının azaldığı görülmektedir. Ancak, üst sıcaklık sınırındaki bu azalma ile paralel olarak alt sıcaklık sınırında bir artış meydana gelmiştir. Başka bir ifadeyle, saf bitüme RET ilavesiyle saf bitümden daha üstün yüksek sıcaklık performansı elde edilirken, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesiyle saf bitüme kıyasla daha üstün düşük sıcaklık performansı elde edilmiştir.

Yukarıda belirtilen bulgulara ek olarak, RET ve RET+bitkisel atık yağ modifikasyonunun bitümlerin kullanılabilir sıcaklık aralığı üzerindeki etkisinin daha net bir şekilde incelenebilmesi amacıyla, yüksek ve düşük sıcaklık sınıflarının farkı belirlenerek Şekil 4.39'da belirtilen kullanılabilir sıcaklık aralığı farkları belirlenmiştir. Daha önce ifade edilen sebeplerle, Şekil 4.39'da gerçek sınıflar dikkate alınarak yapılacak kıyaslamaların daha gerçekçi olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda, RET modifiyeli bitümün saf bitüme kıyasla %10.3 daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilirliği anlaşılmaktadır. Buna ilaveten, RET+%2, %4, %6, %8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin ise saf bitüme kıyasla sırasıyla, %9.1, %10.2, %10.3, %7.5 daha geniş sıcaklık aralıklarında kullanılacakları görülmektedir.



Şekil 4.39. Kullanılabilir sıcaklık farkları

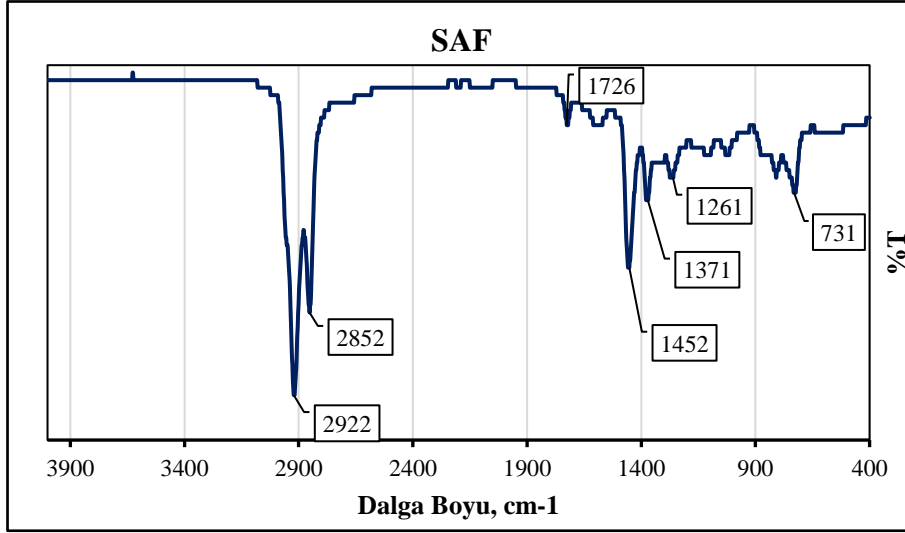
Genel olarak hazırlanan modifiyeli bitümler arasında bir değerlendirme yapılacak olursa, yüksek sıcaklıkların hâkim olduğu bölgelerde RET modifiyeli bitümün kullanılmasının, yüksek ve düşük sıcaklık değişimlerinin fazla olduğu bölgelerde RET+%4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün ve düşük sıcaklıkların hâkim

olduğu bölgelerde RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

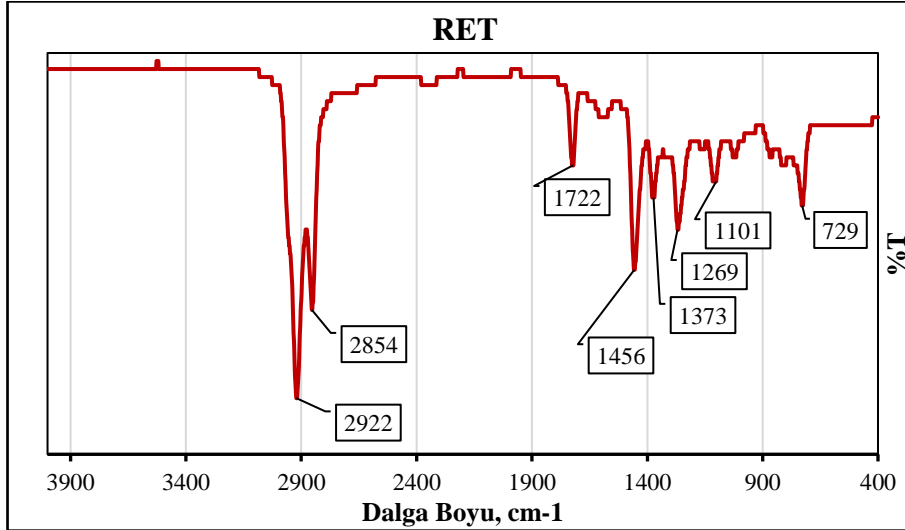
4.3. Kimyasal Özellikler ile İlgili Bulgular

4.3.1. FT-IR Sonuçları

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de sırasıyla saf bitüm ve RET modifiyeli bitüm için FT-IR analizlerinin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Saf bitümün FT-IR spektrumu



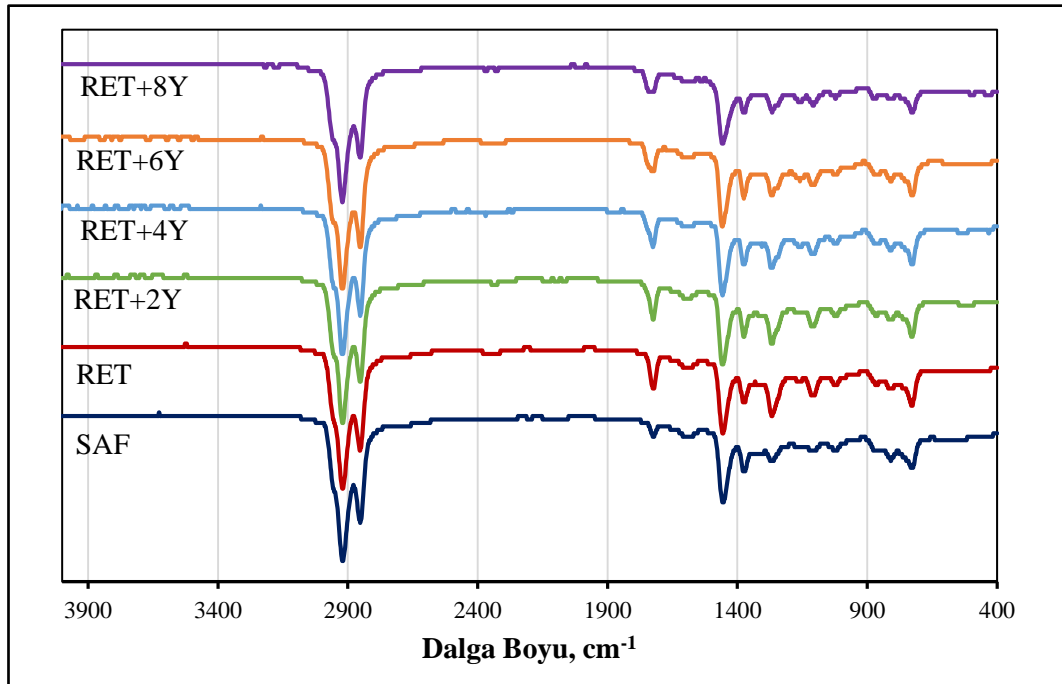
Şekil 4.41. % 1.5 RET ve %0.2 PPA ile modifiye edilmiş bitümün FT-IR spektrumu

Çeşitli kaynaklara başvurularak (Karlsson ve Isacson, 2003; Keyf vd, 2007; Yılmaz, 2016) FT-IR spektrumlarındaki pik noktaların denk geldiği dalga boylarına karşılık gelen bileşik türleri belirlenmiş ve Tablo 4.10’da belirtilmiştir.

Tablo 4.10. Pik değerlere göre bileşik türleri

Numune	Bileşik			
	C-H	C=O	CH ₃ , CH ₂	C-O
Saf Bitüm	2922, 2852	1726	1452, 1371	1261, 731
RET Modifiyeli Bitüm	2922, 2852	1722	1456, 1373	1269, 1101, 729

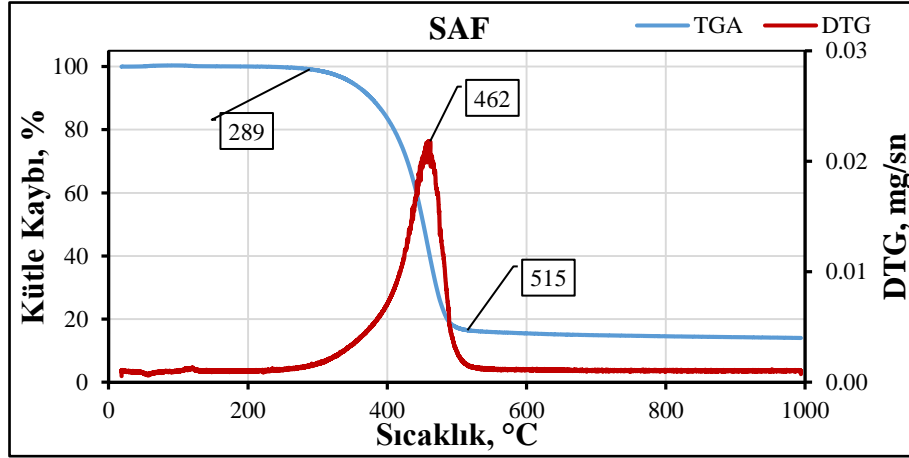
Tablo 4.10 incelendiğinde bitümlerin içerisindeki alifatik hidrokarbon zincirden kaynaklanan C-H gerilim bantları 2922 ve 2852 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenirken CH_3 ve CH_2 grupları ile ilgili deformasyon bantları 1456-1371 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenmiştir. Saf bitüm ile RET modifiyeli bitüm kıyaslandığında en önemli fark C=O gerilim bandı 1722 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir. Bu pik değeri literatürdeki diğer çalışmalar (Keyf vd, 2007) ile benzer şekilde, RET'in asfalten içerisindeki karboksilik asit grupları ile reaksiyona girerek ester bağları oluşturduğunu göstermektedir. Buna ilaveten, Şekil 4.42'de bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm numuneler için FT-IR spektrumları bir arada verilmiştir. Şekil 4.42 incelendiğinde, RET modifiyeli bitüm ile RET+bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin spektrumları arasında belirgin bir farklılık olmadığı görülmektedir. Bu durum, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edildiğinde saf bitüm ile RET arasında meydana gelecek olası kimyasal reaksiyonun negatif olarak etkilenmeyeceği anlamına gelmektedir.



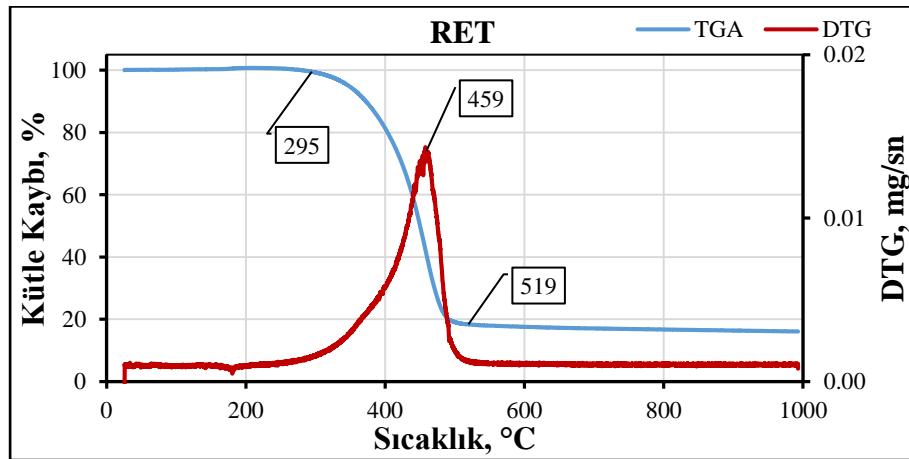
Şekil 4.42. FT-IR spektrumları

4.3.2. TG/DTG Sonuçları

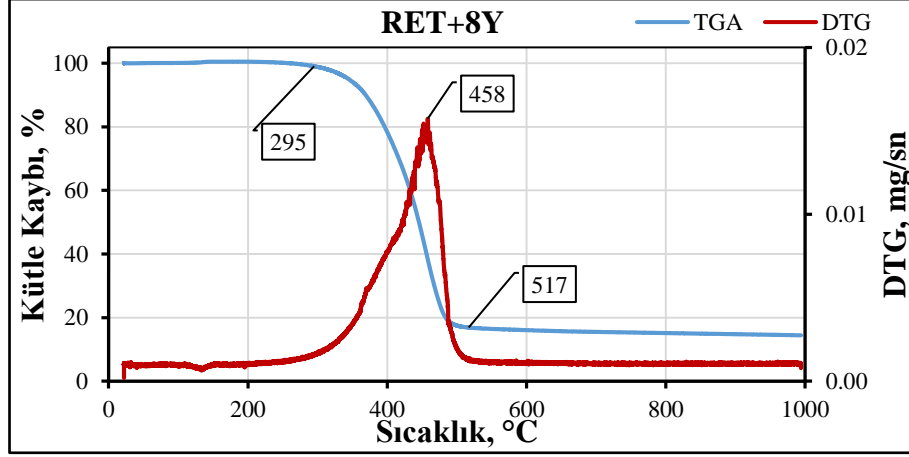
Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45te sırasıyla, saf bitüm, RET modifiyeli bitüm ve RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm için TG/DTG grafikleri verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde saf bitümün 289°C’de, RET modifiyeli ve RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin 295°C’de yapısal bozunmanın başladığı görülmektedir. Yapısal bozunmanın saf bitüm, RET modifiyeli bitüm ve RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm için sırasıyla, 515°C, 519°C ve 517°C’ye kadar aktif bir şekilde devam ettiği ardından sabitlendiği görülmektedir. DTG eğrileri incelendiğinde ise saf bitüm, RET modifiyeli bitüm ve RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm için yapısal bozunmanın en fazla sırasıyla, 462°C, 459°C ve 458°C’de meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.43. Saf bitümün TG/DTG analizi

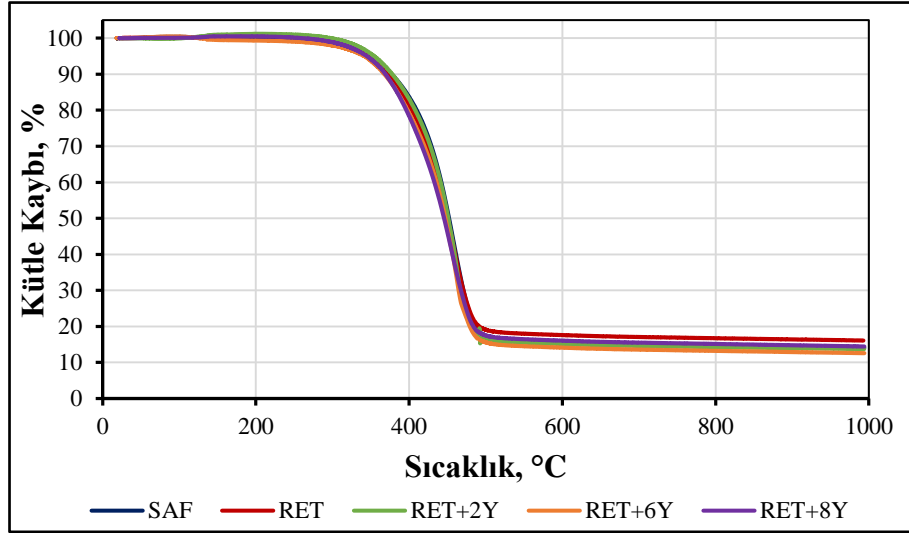


Şekil 4.44. RET modifiyeli bitümün TG/DTG analizi



Şekil 4.45. RET+%8 bitkisel atık yağ ile modifiye edilmiş bitüm TG/DTG analizi

Şekil 4.46’da ise çalışma kapsamında hazırlanan tüm numuneler için TG eğrileri tek bir grafik içerisinde gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde genel olarak saf bitüme katkı malzemesi ilave etmenin saf bitümün ısıl bozunma davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Buna ilaveten, yaklaşık 290°C’ye kadar hiçbir numune artan ısıdan etkilenerek kütle kaybı göstermemiştir. Bu durum, bitümün asfalt kaplamada kullanılacağı sıcaklıklarda kimyasal yapısının ısı etkisiyle bozunmasının zor bir durum olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.46. TG eğrileri

5. SONUÇ

Bu çalışmada, bitüm ağırlığınca %1.5 RET ve %0.2 PPA ile modifiye edilmiş 50/70 penetrasyonlu bitüme, modifiyeli bitümün ağırlığınca %2, %4, %6, %8 oranlarında bitkisel atık yağ ilave edilmiş ve kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin, fiziksel, reolojik ve kimyasal özellikleri geleneksel deneyler, Superpave deneyleri ve kimyasal yapı analizi deneylerinden faydalanılarak incelenmiştir. RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilerek hem işlenebilirliğinin hem de düşük sıcaklık performansının artırılması hedeflenmiş olup deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri sonucunda, saf bitüme RET ilavesinin saf bitümün penetrasyon değerini azalttığı ve yumuşama noktası değerini artırdığı, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin ise RET modifiyeli bitümün penetrasyon değerini artırdığı ve yumuşama noktası değerini azalttığı görülmektedir. Bu durum, RET'in bitümün kıvamlılığını artırdığını, bitkisel atık yağın ise azalttığını göstermektedir. RET+%2 bitkisel atık yağ ilaveli bitümün penetrasyon değeri saf bitümden daha yüksektir. Bununla birlikte, saf bitümün yumuşama noktası değeri RET+%4 ve RET+%6 bitkisel atık yağ ilaveli bitümler arasında kalmıştır.
- Penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde, hem RET ilavesiyle elde edilen numunenin hem de RET ile birlikte atık yağ ilavesiyle elde edilen numunelerin saf bitümün PI değerine kıyasla daha yüksek PI değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ilginç bir şekilde, bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesiyle hem bitümde bir yumuşama meydana geldiğini hem de bitümün ısı hassasiyetinde bir azalmanın söz konusu olduğunu göstermektedir. RET+%8 bitkisel atık yağ ilaveli bitümün PI değeri RET modifiyeli bitümden daha yüksek çıkarken daha düşük yağ miktarlarında RET modifiyeli bitüm daha yüksek PI değerine sahiptir.
- Düktilite deneyi sonuçlarında, hem RET modifikasyonunda hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ modifikasyonunda hazırlanan numunelerde herhangi bir kopma gözlemlenmemiştir. Bu durum, modifikasyonla numunelerin kohezyonunda belirgin bir değişimin olmadığını göstermektedir. Ancak, kuvvet ölçümleri dikkate alındığında, saf bitüme RET ilavesinin kohezyonu

arttırdığı, RET modifiyeli bitüm bitkisel atık yağ ilavesinin ise kohezyonu azalttığı görülmektedir.

- Elastik geri kazanım deneyi sonuçlarında, saf bitüme RET ilavesinin saf bitümün elastik geri kazanım değerini önemli ölçüde arttırdığı, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin ise RET modifiyeli bitümün geri kazanım değerini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Ancak, RET ve %8 bitkisel atık yağ ilaveli bitümün dahi elastik geri kazanım değeri saf bitümden oldukça yüksektir.
- Yanma ve parlama noktası deneyleri sonucunda, hazırlanan modifiyeli bitümlerin iş güvenliği ile ilgili herhangi bir problem teşkil etmeyecekleri anlaşılmaktadır.
- Trikloretilende çözünürlük deneyleri sonucunda, hem RET hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilaveli numuneler trikloretilen içerisinde %99 değerinden daha fazla çözünmüştür.
- Nicholson soyulma deneyi sonucunda, saf bitüme RET ilave edildiğinde soyulma direncinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca, saf bitüme RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilave edildiğinde agrega ile bitüm arasındaki adezyon maksimum seviyeye çıkmış ve koşullanma sonrası agrega yüzeyinden neredeyse hiç bitüm soyulmamıştır.
- Özgül ağırlık deneyi sonucunda, beklenildiği üzere bitkisel atık yağ ilavesi ile bitümlerin özgül ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile uyum içerisinde dir.
- RV deneyleri sonucunda, saf bitüme RET ilavesinin işlenebilirlikte önemli bir kayba yol açtığı, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin ise işlenebilirliği arttırdığı anlaşılmaktadır. Hazırlanan tüm numuneler şartname kriterini sağlamaktadır. Bununla birlikte, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edilmesiyle artan bitkisel atık yağ miktarıyla ters orantılı olarak hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş meydana gelmektedir.
- RTFO deneyleri sonucunda, saf bitüme hem RET ilavesinin hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilavesinin kütle kaybı oranında azalma sağladığı gözlemlenmektedir. Bu durum, iki katkı maddesinin de bitümün yaşlanmaya karşı direncini arttıracaklarını ifade etmektedir. Bununla birlikte, tüm numuneler şartname üst limitinin altında kütle kaybı göstermişlerdir.

- Yüksek sıcaklıklarda yürütülen DSR deneyleri sonucunda, saf bitüme RET ilavesinin tekerlek izi direncinde önemli bir artış sağladığı, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilave edildiğinde ise tekerlek izi direncinde bir kaybın meydana geldiği görülmektedir. Saf bitümün tekerlek izi performansı RET+%4 ve RET+%6 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümler arasında kalmıştır. RET+%2 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm saf bitüme kıyasla daha yüksek tekerlek izi direncine sahiptir.
- Ortalama sıcaklıklarda PAV ile yaşlandırılmış numunelere ait DSR sonuçlarında, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin RET modifiyeli bitümün yorulma dayanımını arttırdığı görülmektedir.
- BBR deneyleri sonucunda, saf bitüme RET ilavesiyle saf bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncinde önemli bir değişimin meydana gelmediği, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesiyle ise RET modifiyeli bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncinde önemli bir artışın meydana geldiği görülmektedir. RET+%4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitüm saf bitüme kıyasla bir üst düşük sıcaklık performans sınıfında yer almıştır.
- Hazırlanan numunelere ait performans sınıfı aralıkları dikkate alındığında saf bitüme RET ilavesinin saf bitümün kullanılacağı sıcaklık aralığını arttırdığı, RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin ise artan bu sıcaklık aralığı üzerinde belirgin bir negatif etkisinin olmadığı görülmektedir.
- FT-IR analizleri sonucunda, saf bitüme RET ilavesiyle FT-IR spekttrumunda meydana gelen en önemli değişimin literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak 1722 cm^{-1} dalga boyunda meydana gelmiştir. Bu durum, RET'in asfalten içerisindeki karboksilik asit grupları ile reaksiyona girerek ester bağları oluşturduğunu göstermektedir. RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesiyle FT-IR spektrumunda önemli bir değişim gözlemlenmemiştir.
- TG/DTG analizleri sonucunda, saf bitüme hem RET ilavesinin hem de RET ile birlikte bitkisel atık yağ ilavesinin saf bitümün ısıl bozunma davranışında önemli bir değişim göstermediği anlaşılmıştır. Ayrıca, bitümlerin kullanılacağı sıcaklıklar dikkate alındığında kimyasal yapılarında ısıl bozunmanın meydana gelmeyeceği düşünülmektedir.

Yürütülen deneylerin sonuçları toplu bir şekilde değerlendirildiğinde, çalışmanın amacına uygun olarak; RET modifiyeli bitüme bitkisel atık yağ ilavesinin RET modifiyeli bitümün hem işlenebilirliğini hem de düşük sıcaklıklardaki performansını arttırabileceği görülmektedir. İşlenebilirlikte meydana gelen artış sayesinde bitümlü sıcak karışımların üretiminde kolaylık sağlanacağı ve buna ilaveten karıştırma ve sıkıştırma işlemlerinde enerji tasarrufu sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Buna ilaveten, düşük sıcaklık performansındaki artış RET ve bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerin daha düşük sıcaklıkların hâkim olduğu bölgelerde kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca, RET ilavesi sayesinde kullanılabilir sıcaklık aralığının arttırıldığı ve bitkisel atık yağ ilavesinin bu hususta herhangi bir negatif etkisi olmadığı düşünülerek, RET ve bitkisel atık yağ modifiyeli bitümlerinin yüksek sıcaklık değişimlerine uygun bölgelerde de kullanılabilir olacağı düşünülmektedir.

Genel olarak hazırlanan modifiyeli bitümlerin kullanılması için uygun sıcaklıklar belirlenecek olursa farklı iklim koşullarında farklı kombinasyonların kullanılabilmesi ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıkların hâkim olduğu bölgelerde RET modifiyeli bitümün, yüksek ve düşük sıcaklık değişimlerinin fazla olduğu bölgelerde RET+%4 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün ve düşük sıcaklıkların hâkim olduğu bölgelerde RET+%8 bitkisel atık yağ modifiyeli bitümün kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Bitkisel atık yağ katkısının polimerler veya farklı katkı maddeleri ile kullanımının daha geniş bir şekilde incelenmelidir. Buna ilaveten, bitkisel atık yağ ilavesinin soyulma direnci üzerindeki etkisinin farklı yöntemlerle detaylı bir şekilde incelenmesi faydalı olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Adesina, P. A. and Dahunsi, B. I. 2020. Blended waste utilization in road construction: physical characteristics of bitumen modified with waste cooking oil and high-density polyethylene. *International Journal of Pavement Research and Technology*. doi:10.1007/s42947-020-0040-1.
- Ahmedzade, P. 2013. The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 38, 285-291. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.090.
- Airey, G. D. 2002. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16:8, 473-487. doi:10.1016/S0950-0618(02)00103-4.
- Al-Hadidy, A. I. and Tan, Y. Q. 2009. Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23:8, 2941-2950. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.023.
- Al-Omari, A. A., Khedaywi, T. S. and Khasawneh, M. A. 2018. Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11:1, 68-76. doi:10.1016/j.ijprt.2017.09.004.
- Ali, A., ur Rehman, Z., Farooq, U. and Mirza, M. W. 2018. Evaluation of Rutting Potential of Polymer Modified Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep and Recovery Method. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*:1.
- Almusawi, A., Sengoz, B. and Topal, A. 2021. Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, 268, 121140. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121140.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M. and Karim, M. R. 2012. Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 37, 398-405. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042.
- ASTM D5. (2020). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D36-14. (2020). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D70. (2021). *Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D92. (2018). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D113. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2042. (2015). *Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM D2872. (2019). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6084. (2018). *Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Ductilometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6373. (2021). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6521. (2019). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6648. (2016). *Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7175. (2015). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Athira, P. K., Atul Narayan, S. P., Murali Krishnan, J. and Jain, P. K. 2020. Comparison of binder and mixture tests to characterize permanent deformation of elastomer and terpolymer modified binders. *Construction and Building Materials*, 264, 120138. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120138.
- Azahar, W. N. A. W., Bujang, M., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Ngadi, N. and Al Bakri, M. M. A. 2016a. Performance of waste cooking oil in asphalt binder modification. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 216-226.
- Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M. and Ngadi, N. 2016b. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 126, 218-226. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.032.
- Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M. and Ngadi, N. 2017. Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 150, 653-663. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.048.
- Bagdat, T., Galiya, I. and Yerik, A. 2015. Rheological Properties of Oxidized Bitumen with Polymer Additive. *Journal of Applied Sciences*, 15:1, 129-137. doi:10.3923/jas.2015.129.137.
- Bailey, H. K. and Phillips, P. 2010. Asphalt Rejuvenation. United States Patent No. US 2010/0034586 A1
- Behnood, A. and Gharehveran, M. M. 2019. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791. doi:10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.

- Bhurke, A. S., Shin, E. E. and Drzal, L. T. 1997. Fracture morphology and fracture toughness measurement of polymer-modified asphalt concrete. *Asphalt Mixture Quality, Characteristics, and Performance*:1590, 23-33.
- Bisantiye. (2021). Asphalt Betonlu Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar, Nedenleri ve İyileştirmeleri. Retrieved April 13, 2021. <https://www.bisantiye.com/asfalt-betonu-kaplamalarda-meydana-gelen-bozulmalar-nedenleri-ve-iyilestirilmeleri/>
- Bowering, R. H. 1984. Modified Bitumens. Proceedings of the Australian asphalt pavement association conference, Australian Asphalt Pavement Association, Hobart, Tasmania. Kew, Victoria.
- Bulatovic, V. O., Rek, V. and Markovic, J. 2014. Rheological properties of bitumen modified with ethylene butylacrylate glycidylmethacrylate. *Polymer Engineering and Science*, 54:5, 1056-1065. doi:10.1002/pen.23649.
- Bulatovic, V. O., Rek, V. and Markovic, K. J. 2013. Influence of polymer types on bitumen engineering properties. *Materials Research Innovations*, 17:3, 189-194. doi:10.1179/1433075x12y.0000000059.
- Cavdar, E., Kumandas, A. and Oruc, S. 2019. Effect of Waste Cooking Oil Use in the Modification of SBS Modified Asphalt Binder. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, 1653-1659, Bayburt, Turkey.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S. and Sang, Y. 2014a. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66, 286-298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033.
- Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B. and Wu, S. 2014b. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, 59, 10-16. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
- de Sá Araujo, M. d. F. A., Lins, V. d. F. C., Pasa, V. M. D. and Leite, L. F. M. 2013. Weathering aging of modified asphalt binders. *Fuel Processing Technology*, 115, 19-25. doi:10.1016/j.fuproc.2013.03.029.
- Dokandari, P. A., Kaya, D., Sengoz, B. and Topal, A. 2017. Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement.
- Domingos, M. D. I., Faxina, A. and Bernucci, L. L. B. 2020. Rutting on Asphalt Binders and Mixtures Modified with PPA and Elvaloy®: Laboratory Aspects and Rheological Modeling.
- Domingos, M. D. I. and Faxina, A. L. 2015a. Accelerated short-term ageing effects on the rheological properties of modified bitumens with similar high PG grades. *Road Materials and Pavement Design*, 16:2, 469-480. doi:10.1080/14680629.2014.995209.
- Domingos, M. D. I. and Faxina, A. L. 2015b. Rheological analysis of asphalt binders modified with Elvaloy® terpolymer and polyphosphoric acid on the multiple stress creep and recovery test. *Materials and Structures*, 48:5, 1405-1416. doi:10.1617/s11527-013-0242-y.
- Domingos, M. D. I., Faxina, A. L. and Bernucci, L. L. B. 2017. Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance.

- Dow. (2021). ELVALOY™ 5160 Copolymer Technical Data Sheet. Retrieved April 13, 2021. <https://www.dow.com/en-us/document-viewer.html?randomVar=2921839701448924971&docPath=/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/914/914-13601-01-elvaloy-5160-copolymer-tds.pdf>
- Durga Prashanth, L., Palankar, N. and Ravi Shankar, A. U. 2019. A study on the effect of rejuvenators in reclaimed asphalt pavement based stone mastic asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12:1, 9-16. doi:10.1007/s42947-019-0002-7.
- El-Shorbagy, A. M., El-Badawy, S. M. and Gabr, A. R. 2019. Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement. *Construction and Building Materials*, 220, 228-237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.180.
- Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S. and Saltan, M. 2017. Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17:4, 863-870. doi:10.1016/j.acme.2017.03.006.
- Gama, D. A., Rosa, J. M., de Melo, T. J. A. and Rodrigues, J. K. G. 2016. Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, 290-295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.142.
- Gama, D. A., Yan, Y., Rodrigues, J. K. G. and Roque, R. 2018. Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. *Construction and Building Materials*, 169, 522-529. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.206.
- Geckil, T. 2019. Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer-Modified Bitumen. *Materials (Basel)*, 12:6. doi:10.3390/ma12060921.
- Geckil, T. and Seloglu, M. 2018. Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and Building Materials*, 173, 262-271. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036.
- Giavarini, C., De Filippis, P., Santarelli, M. L. and Scarsella, M. 1996. Production of stable polypropylene-modified bitumens. *Fuel*, 75:6, 681-686. doi:10.1016/0016-2361(95)00312-6.
- Gokalp, I. and Uz, V. E. 2019. Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in bitumen: Zero tolerance aging approach. *Construction and Building Materials*, 227. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116695.
- Hafeez, I. and Kamal, M. A. 2009. A rheological comparison of hard grade binders with polymer modified bitumen under aged and unaged conditions. *Materials Characterisation Iv: Computational Methods and Experiments*, 64, 105-114. doi:10.2495/Mc090101.
- Hesp, S. A. M., Hoare, T. R. and Roy, S. D. 2002. Low-temperature Fracture in Reactive-ethylene-terpolymer-modified Asphalt Binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 3:3, 153-159. doi:10.1080/1029843021000067809.
- Hunter, R. N., Self, A. and Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*. London: ICE Publishing.

- IDEA. (2021). Pavement Inspection. AC Distress Measurement. Swelling. Retrieved April 13, 2021. <https://idea.appliedpavement.com/hosting/massachusetts/pavement-inspection/pci-review/distresses-ac/swelling.html>
- Irfan, M., Saeed, M., Ahmed, S. and Ali, Y. 2017. Performance Evaluation of Elvaloy as a Fuel-Resistant Polymer in Asphaltic Concrete Airfield Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29:10. doi:10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0002018.
- Isacsson, U. and Lu, X. 1995. Testing and Appraisal of Polymer-Modified Road Bitumens - State-of-the-Art. *Materials and Structures*, 28:177, 139-159. doi:10.1007/Bf02473221.
- Isacsson, U. and Lu, X. H. 1999. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. *Journal of Materials Science*, 34:15, 3737-3745. doi:10.1023/A:1004636329521.
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J. and Zanzotto, L. 2015. Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology*, 140, 172-179. doi:10.1016/j.fuproc.2015.09.002.
- Javid, M. A. 2016. Effect of polymer modification on rheological properties of asphalt. *Journal of Civil Engineering Research*, 6:3, 55-60. doi:10.5923/j.jce.20160603.02.
- Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S. and Sun, L. 2017. Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29:3, D4016003. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769.
- Joni, H. H., Al-Rubae, R. H. A. and Al-zerkani, M. A. 2019. Rejuvenation of aged asphalt binder extracted from reclaimed asphalt pavement using waste vegetable and engine oils. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00279. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00279.
- Karlsson, R. and Isacsson, U. 2003. Application of FTIR-ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15:2, 157-165. doi:10.1061/(Asce)0899-1561(2003)15:2(157).
- Keyf, S. 2010. Investigation of Penetration and Penetration Index in Bitumen Modified with SBS and Reactive Terpolymer. *Sigma*, 28, 26-34.
- Keyf, S. 2015. The modification of bitumen with reactive ethylene terpolymer, styrene butadiene styrene and variable amounts of ethylene vinyl acetate. *Research on Chemical Intermediates*, 41:3, 1485-1497. doi:10.1007/s11164-013-1287-9.
- Keyf, S., Ismail, O. and Corbacioglu, B. D. 2007. Polymer-modified bitumen using ethylene terpolymers. *Petroleum Science and Technology*, 25:7, 915-923. doi:10.1080/10916460500411812.
- KGM. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Ankara.
- Kodrat, I., Sohn, D. and Hesp, S. A. M. 2007. Comparison of polyphosphoric acid-modified asphalt binders with straight and polymer-modified materials. *Transportation Research Record*, 1998:1998, 47-55. doi:10.3141/1998-06.
- Kök, B. V. (2007). *Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 116, Elazığ.

- Kök, B. V. (2019). *Karayolu mühendisliği ve tasarımı*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kraus, G. 1982. Modification of Asphalt by Block Polymers of Butadiene and Styrene. *Rubber Chemistry and Technology*, 55:5, 1389-1402. doi:10.5254/1.3535936.
- Krutz, N. C., Siddharthan, R. V. and Stroup-Gardiner, M. 1991. Investigation of rutting potential using static creep testing on polymer-modified asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*:1317.
- Kutluhan, S. and Açar, E. 2009. Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler. *İTÜ DERGİSİ/d*, 8:6, 179-191.
- Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P. and Ma, Q. 2019. Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. *Applied Sciences*, 9:9, 1767. doi:10.3390/app9091767.
- Li, X. J., Clyne, T., Reinke, G., Johnson, E. N., Gibson, N. and Kutay, M. E. 2011. Laboratory Evaluation of Asphalt Binders and Mixtures Containing Polyphosphoric Acid. *Transportation Research Record*:2210, 47-56. doi:10.3141/2210-06.
- Line.17qq. (2021). Photo Example Asphalt Rutting. Retrieved April 13, 2021. <https://line.17qq.com/articles/huqewhrrx.html>
- Liu, S., Zhou, S., Peng, A. and Li, W. 2020. Investigation of physiochemical and rheological properties of waste cooking oil/SBS/EVA composite modified petroleum asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, 137:26, 48828. doi:10.1002/app.48828.
- Lu, X. H., Isacsson, U. and Ekblad, J. 1999. Phase separation of SBS polymer modified bitumens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11:1, 51-57. doi:10.1061/(Asce)0899-1561(1999)11:1(51).
- Maharaj, R., Ramjattan-Harry, V. and Mohamed, N. 2015. Rutting and Fatigue Cracking Resistance of Waste Cooking Oil Modified Trinidad Asphaltic Materials. *The Scientific World Journal*, 2015, 385013. doi:10.1155/2015/385013.
- McGennis, R. B., Shuler, S. and Bahia, H. U. 1994. *Background of Superpave asphalt binder test methods*. (FHWA-SA-94-069). Asphalt Institute. Federal Highway Administration Office of Technology Applications.
- Michon, L. C., Williams, T. M. and Miknis, F. P. 1998. Use of the environmental scanning electron microscope to investigate three polymer modified asphalts. *Petroleum Science and Technology*, 16:7-8, 797-809. doi:10.1080/10916469808949812.
- Minnesota DOT. (2021). Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements. Retrieved April 13, 2021. http://www.dot.state.mn.us/mnroad/projects/Low_Temp_Cracking/
- Nie, X. Y., Li, Z., Yao, H. R., Hou, T. J., Zhou, X. L. and Li, C. L. 2020. Waste bio-oil as a compatibilizer for high content SBS modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 38:4, 316-322. doi:10.1080/10916466.2019.1703741.
- Nordiana, M., Nur Aifa, W. A. W., Hainin, M. R., Naqiuddin, M. W. M., Norhidayah, A. H., Haryati, Y., Juraidah, A. and Ramadhansyah, P. J. 2019. Rutting resistance of untreated and treated waste cooking oil in bitumen after aging condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 244, 012041. doi:10.1088/1755-1315/244/1/012041.

- Nunez, J. Y. M., Domingos, M. D. I. and Faxina, A. L. 2014. Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, 73, 509-514. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.002.
- Oruc, S. and Yilmaz, B. 2016. Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*, 123, 207-213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.003.
- Oruç, Ş. (1997). *Torul kalker taşıcağı agregalarının asfalt betonu içerisindeki performansının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, Trabzon.
- PavementInteractive. (2021a). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Bleeding. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/bleeding/>
- PavementInteractive. (2021b). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Joint Problems. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/joint-problems/>
- PavementInteractive. (2021c). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Patholes. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/potholes/>
- PavementInteractive. (2021d). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Raveling. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/raveling/>
- PavementInteractive. (2021e). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Reflection Cracking. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/reflection-cracking/>
- PavementInteractive. (2021f). Reference Desk. Pavement Management. Pavement Distresses. Slippage Cracking. Retrieved April 13, 2021. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/slippage-cracking/>
- Pereira, L., Freire, A. C., Sá da Costa, M., Antunes, V., Quaresma, L. and Micaelo, R. 2018. Experimental study of the effect of filler on the ductility of filler-bitumen mastics. *Construction and Building Materials*, 189, 1045-1053. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.063.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C. 2007. High temperature stability of different polymer-modified bitumens: A rheological evaluation. *Journal of Applied Polymer Science*, 103:2, 1166-1174. doi:10.1002/app.25336.
- Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F. J., Gallegos, C., Gonzalez, O., Munoz, M. E. and Santamaria, A. 2003. Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen. *Fuel*, 82:11, 1339-1348. doi:10.1016/S0016-2361(03)00065-6.
- Piazza, S., Arcozzi, A. and Verga, C. 1980. Modified Bitumens Containing Thermoplastic Polymers. *Rubber Chemistry and Technology*, 53:4, 994-1005. doi:10.5254/1.3535075.

- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z. and Zanzotto, L. 2004a. Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280:2, 366-373. doi:10.1016/j.jcis.2004.08.043.
- Polacco, G., Stastna, J., Vlachovicova, Z., Biondi, D. and Zanzotto, L. 2004b. Temporary networks in polymer-modified asphalts. *Polymer Engineering and Science*, 44:12, 2185-2193. doi:10.1002/pen.20246.
- Raqeeb, M. A. and Bhargavi, R. 2015. Biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7:12, 670-681.
- Rasman, M., Hassan, N. A., Hainin, M. R., Jaya, R. P., Yaacob, H., Shukry, N. A. M., Abdullah, M. E. and Kamaruddin, N. H. M. 2018. Engineering properties of bitumen modified with bio-oil. *12th International Civil Engineering Post Graduate Conference (Sepka) - the 3rd International Symposium on Expertise of Engineering Design (Iseed) (Sepka-Iseed 2018)*, 250. doi:10.1051/mateconf/201825002003.
- Reese, R. and Predoehl, N. 1989. *Evaluation of Modified Asphalt Binders. Interim Report*.
- RocciasAsphalt. (2021). How to Fix Alligator Cracking. Retrieved April 13, 2021. <http://rocciasphalt.blogspot.com/2016/10/how-to-fix-alligator-cracking.html>
- Rodrigues, C., Capitão, S., Picado-Santos, L. and Almeida, A. 2020. Full Recycling of Asphalt Concrete with Waste Cooking Oil as Rejuvenator and LDPE from Urban Waste as Binder Modifier. *Sustainability*, 12:19, 8222. doi:10.3390/su12198222.
- Romberg, J. W., Nesmith, S. D. and Traxler, R. N. 1959. Some Chemical Aspects of the Components of Asphalt. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 4:2, 159-161. doi:10.1021/jc60002a014.
- Sadek, H., Rahaman, M. Z., Lemke, Z., Bahia, H. U. and Swiertz, D. 2020. Effect of low-temperature modifiers on HMA mixture aging and cracking resistance. *Construction and Building Materials*, 237, 117456. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117456.
- Selvavathi, V., Sekar, V. A., Sriram, V. and Sairam, B. 2002. Modifications of bitumen by elastomer and reactive polymer - A comparative study. *Petroleum Science and Technology*, 20:5-6, 535-547. doi:10.1081/Lft-120003577.
- Sengoz, B. and Topal, A. 2005. Use of asphalt roofing shingle waste in HMA. *Construction and Building Materials*, 19:5, 337-346. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.08.005.
- Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N. and Ramjattan-Harry, V. 2017. Potential of used frying oil in paving material: solution to environmental pollution problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 24:13, 12220-12226. doi:10.1007/s11356-017-8793-z.
- Singh, D., Ashish, P. K., Chander, S., Habal, A. and Kataware, A. 2019a. Effect of Warm-Mix Additives and Lime on Intermediate-Temperature Fracture Property of RET- and PPA-Modified Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31:7, 04019112. doi:10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0002756.
- Singh, D., Ashish, P. K., Kataware, A. and Habal, A. 2017. Evaluating Performance of PPA-and-Elvaloy-Modified Binder Containing WMA Additives and Lime Using MSCR and LAS Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29:8. doi:10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0001934.

- Singh, D., Ashish, P. K., Kataware, A. and Habal, A. 2019b. Effects of WMA additives and hydrated lime on high-stress and high-temperature performance of Elvaloy®- and PPA-modified asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 20:6, 1354-1375. doi:10.1080/14680629.2018.1446040.
- Singh, D., Habal, A., Ashish, P. K. and Kataware, A. 2018. Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Construction and Building Materials*, 158, 949-960. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.079.
- Skronka, G., Jasso, M. and Vacin, O. 2019. Determination of rutting distresses on hot mix asphalts by advanced techniques. MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.
- Srivastava, A. and Prasad, R. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4:2, 111-133. doi:10.1016/S1364-0321(99)00013-1.
- Statista. (2021). Consumption of vegetable oils worldwide from 2013/14 to 2020/2021, by oil type. Retrieved April 13, 2021. <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/#:~:text=In%202019%2F20%2C%20sunflowerseed%20oil,metric%20to%20in%202019%2F20>.
- Stock, A. and Arand, W. 1993. Low temperature cracking in polymer modified binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 62.
- Suo, Z. and Wong, W. G. 2009. Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents. *Construction and Building Materials*, 23:12, 3492-3498. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.07.004.
- Tayfur, S., Ozen, H. and Aksoy, A. 2007. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21:2, 328-337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014.
- TDK. (2021). Bitüm. Retrieved April 13, 2021. <https://sozluk.gov.tr/>
- Topal, A. 2010. Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens. *Fuel Processing Technology*, 91:1, 45-51. doi:10.1016/j.fuproc.2009.08.007.
- Topal, A., Yilmaz, M., Kok, B. V., Kuloglu, N. and Sengoz, B. 2011. Evaluation of Rheological and Image Properties of Styrene-Butadiene-Styrene and Ethylene-Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens. *Journal of Applied Polymer Science*, 122:5, 3122-3132. doi:10.1002/app.34282.
- TS EN 1426. (2015). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1427. (2015). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12592. (2015). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Çözünürlük tayini*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12607-1. (2015). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 1: RTFOT yöntemi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12697-11. (2020). *Bitümlü karışımlar - Test yöntemleri - Bölüm 11: Agregaya ve bitüm arasındaki benzeşmenin belirlenmesi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13302. (2018). *Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Dönen mil cihazı ile bitümlü bağlayıcının dinamik viskozitesinin belirlenmesi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13398. (2018). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün elastik geri kazanımının belirlenmesi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14769. (2012). *Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Basınçlı yaşlandırma kabı (pav) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14770. (2012). *Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14771. (2012). *Bitumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR)*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 15326+A1. (2010). *Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yoğunluk ve özgül kütle tayini-Kapiler kapaklı piknometre yöntemi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 2592. (2017). *Petrol ve ilgili ürünler - Parlama ve yanma noktasının tayini - Cleveland açık kap yöntemi*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A. (2001). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Ankara: Atlas Yayın Dağıtım.
- Utracki, L. A. 1995. History of Commercial Polymer Alloys and Blends (from a Perspective of the Patent Literature). *Polymer Engineering and Science*, 35:1, 2-17. doi:10.1002/pen.760350103.
- Uz, V. E. and Gökalp, İ. 2020. Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases. *Waste Management*, 110, 1-9. doi:10.1016/j.wasman.2020.05.012.
- Vachhani, K. K. and Mishra, C. 2014. Influence of VG30 grade bitumen with and without reactive ethylene terpolymer (Elvaloy® 4170) in short term aging. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4, 4206-4209.
- Valkering, C. and Vonk, W. 1990. Thermoplastic rubbers for the modification of bitumens: Improved elastic recovery for high deformation resistance of asphalt mixes. Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 15th, 1990, Darwin, Northern Territory.
- Wang, C., Xie, T. T. and Cao, W. 2019. Performance of bio-oil modified paving asphalt: chemical and rheological characterization. *Materials and Structures*, 52:5. doi:10.1617/s11527-019-1399-9.
- Wardlaw, K. R. and Shuler, S. 1992. Polymer modified asphalt binders. ASTM Philadelphia.
- Xiao, F. P., Amirkhanian, S., Wang, H. N. and Hao, P. W. 2014. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 64, 316-323. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.082.

- Xinxin, C., Xuejuan, C., Boming, T., Yuanyuan, W. and Xiaolong, L. 2018. Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt. *Applied Sciences*, 8:5, 765. doi:10.3390/app8050765.
- Xu, C., Zhang, Z. Q. and Liu, F. F. 2020. Improving the Low-Temperature Performance of RET Modified Asphalt Mixture with Different Modifiers. *Coatings*, 10:11, 1070. doi:10.3390/coatings10111070.
- Xu, C., Zhang, Z. Q., Zhao, F. Q., Liu, F. F. and Wang, J. R. 2019. Improving the performance of RET modified asphalt with the addition of polyurethane prepolymer (PUP). *Construction and Building Materials*, 206, 560-575. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.101.
- Yayla, N. (2018). *Karayolu mühendisliği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Yidirim, Y. 2007. Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21:1, 66-72. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007.
- Yılmaz, B. (2016). *Bor içerikli organik katkıyla modifiye edilen asfaltın performans özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 181, Trabzon.
- Yılmaz, M., Kok, B. V. and Kuloglu, N. 2011. Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25:11, 4279-4286. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.072.
- Yu, X., Zaumanis, M., dos Santos, S. and Poulikakos, L. D. 2014. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162-171. doi:10.1016/j.fuel.2014.06.038.
- Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S. and Giustozzi, F. 2021. Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 278. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123304.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. and Karim, M. R. 2012. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, 254-258. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.06.021.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L. and Frank, R. 2014. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538-550. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.
- Zhu, J. Q., Birgisson, B. and Kringos, N. 2014. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38. doi:10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005.

ÖZGEÇMİŞ

Aytuğ KUMANDAŞ, aslen Trabzon Oflu olmakla birlikte 24.11.1995 tarihinde Ankara’da doğdu. İlköğretiminin bir kısmı Ankara’da kalan kısmını ve orta öğretimini ise İzmir’de tamamladı. Lise eğitimini İzmir Karşıyaka Lisesi’nde tamamladıktan sonra 2013-2018 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden bölüm birinciliği ve fakülte üçüncülüğü dereceleri ile mezun oldu. Mezuniyetinin hemen sonrasında Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminin birinci yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Ana Bilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. Görev yeri sebebiyle yüksek lisans eğitimine Ondokuz Mayıs Üniversitesi’nde devam etti. İleri derecede İngilizce bilmekte ve halen Ondokuz Mayıs Üniversitesi’nde araştırma görevlisi görevine devam etmektedir.

İletişim Bilgileri

E mail : aytug.kumandas@omu.edu.tr

Telefon : 0554 770 91 38

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1765-9963>

Yayınlanmış Çalışmalar:

1. Kumandaş, A., Çavdar, E., Pancar, E. B. ve Oruç, Ş. Bitkisel Atık Yağ, RET ve PPA Kompozit Modifiyeli Bitümün Reolojik Özelliklerinin DSR ve BBR ile Araştırılması, 12 / 2020, International IDU Engineering Symposium IES'20, Izmir, Turkey.
2. Cavdar, E., Kumandas, A. and Oruc, S. Effect of waste cooking oil use in the modification of SBS modified asphalt binder, 9 / 2019, 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey.