



**PLASTİK POŞET VE CAM ATIKLARI İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICI
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kürşat GÜRKAN

Danışman

Prof. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2025

Bu tez çalışması TÜBİTAK 122N273 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLASTİK POŞET VE CAM ATIKLARI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ
BİTÜMLÜ BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kürşat GÜRKAN

Danışman

Prof. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Kürşat GÜRKAN tarafından hazırlanan "Plastik Poşet ve Cam Atıkları ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcı Özelliklerinin Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman	: Prof. Dr. Cahit GÜRER	
İkinci Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU	
Başkan	: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Prof. Dr. Cahit GÜRER Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Üye	: Prof. Dr. İsmail DEMİR Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Üye	: Doç. Dr. Tuba KÜTÜK SERT Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../.....tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24 / 01 / 2025

Kürşat GÜRKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PLASTİK POŞET VE CAM ATIKLARI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kürşat GÜRKAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU

Dünyada hızla artan insan nüfusu, tüketime bağlı atık miktarının artışını doğrudan etkilemektedir. Mevcut hammadde kaynaklarının orantısız tüketimi, toprak, su ve hava kirliliği, zamanla yetersiz atık depolama alanları gibi öncelikle insan ve çevre sağlığını etkileyen sorunları ortadan kaldırmanın en temel yolu, etkili atık yönetiminden geçmektedir. Bu bağlamda, günümüzde hızla artan atık malzemelerin, geri dönüşüm için bile enerji tüketmeden tekrar kullanılması, atık bertarafı için önemli bir çözümdür. Bu çalışmada, atık cam şişeler ve plastik poşetler bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. 15 adet modifiye bitüm ve 1 adet saf bitüm (kontrol), her ikisini de farklı oranlarda bitüm içeren cam atığı (%0, 0,5, 1,0, 1,5, 3,0, 5,0%), plastik torba atığı (%0, 0,5, 1,0, 1,5, 3,0, 5,0%) ve hibrit atık (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) malzemelerinin farklı oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanmış ve numuneler üzerinde fiziksel ve reolojik testler yapılmıştır. Test sonuçlarına göre %1 serisi cam atığı, %3 serisi plastik poşet atığı ve 0,5 CA + 1,5 PPA serisi hibrit atık numuneleri daha iyi davranış göstermiştir.

2024, vii + 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: Modifiye Bitüm, Atık, Cam Atığı, Plastik Poşet Atığı, Hibrit Atık, Yeniden Kullanım.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF BITUMINOUS BINDER PROPERTIES MODIFIED WITH PLASTIC BAGS AND GLASS WASTES

Kürşat GÜRKAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Cahit GÜRER

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Murat Vergi TACIROĞLU

The rapidly increasing human population in the world directly affects the increase in the amount of waste. The most basic way to eliminate problems that primarily affect human and environmental health, such as disproportionate consumption of existing raw material resources, soil, water and air pollution, and insufficient waste storage areas over time, is through effective waste management. In this context, reusing waste materials, which are rapidly increasing today, without consuming energy even for recycling, is an important solution for waste disposal. In this study, waste glass bottles and plastic bags were used in bitumen modification. 15 modified bitumen and 1 pure bitumen, glass waste (0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 5.0%), plastic bag waste (0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 5.0%) and hybrid waste (0.5 WGP + 0.5 NBW; 0.5 WGP + It was prepared by mixing the materials (1.0 NBW; 0.5 WGP + 1.5 NBW; 0.5 WGP + 2.0 NBW; 1.0 WGP + 2.0 NBW) in different proportions and physical and rheological tests were performed on the samples. According to the test results, 1% series glass waste, 3% series plastic bag waste and 0.5 WGP + 1.5 NBW series hybrid waste samples showed better behavior.

2024, vii + 73 pages

Keywords: Modified Bitumen, Waste, Glass Waste, Plastic Bag Waste, Hybrid Waste, Reusing

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın en başından sonuna kadar üzerimdeki bütün emek ve katkılarından dolayı, ayrıca bana aktardığı bilgilerinden dolayı çok değerli tez danışmanım Prof. Dr. Cahit GÜRER'e ve ikinci tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU'na deneysel çalışmalarımın başlangıcından itibaren her türlü destek ve tavsiyeleri için Arş. Grv. Burak Enis KORKMAZ, Arş.Grv Şule YARCI ve Öğr. Gör. Ayfer ELMACI hocalarıma teőekkürü bir borç bilirim.

Tezimin en kritik dönemlerinde yardımını esirgemeyen meslektaşlarım İnşaat Yüksek Mühendisi Hakkı Arda DÜZGÜN'e, İnşaat Yüksek Mühendisi Ömer SINAN'a ve İnşaat Yüksek Mühendisi Veli Burak SEZEN'e teőekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, her şekilde yanımda olarak bana motivasyon veren aileme teşekkür ederim.

Kürşat GÜRKAN
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	i
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
RESİMLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Bitüm	4
2.1.1 Bitüm Modifikasyonu	4
2.1.2 Bitümlü Malzemeler.....	5
2.1.3 Bitüm Çeşitleri	6
2.1.4 Bitümün Fonksiyonel Gereksinimleri	7
2.1.5 Bitümün Özellikleri.....	8
2.2 Yol Kaplamaları.....	8
2.2.1 Yol Kaplama Çeşitleri.....	11
2.2.1.1 Esnek Yol Üstyapıları	12
2.2.1.2 Rijit Yol Üstyapısı.....	13
2.2.2 Diğer Yol Yapıları.....	14
2.3 Atık Malzemeler	14
2.3.1 Geri Dönüştürülmüş Plastikler.....	15
2.3.1.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.....	16
2.3.1.2 Plastikle Modifiye Edilmiş Asfalt	17
2.3.1.3 Performans ve İşlevsel Faydalar.....	19
2.3.2 Cam Atıklarının Geri Dönüşümü	20
2.4 Tez Konusu ile ilgili Yapılmış Önceki Çalışmalar	22
3. MATERYAL ve METOT	32
3.1 Materyal	32

3.2 Metot.....	34
3.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi	36
3.2.2 Penetrasyon Deneyi.....	36
3.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi.....	37
3.2.4 Dönel Viskozite Deneyi	37
3.2.5 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Parametreleri	37
3.2.6 Dönel İnce Film Fırını (RTFO) ile Kısa Dönem Yaşlandırma Deneyi...	38
3.2.7 Nicholson Soyulma Deneyi.....	40
3.2.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi.....	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
4.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	42
4.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları	43
4.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	44
4.4 Dönel Viskozite Deneyi Sonuçları	46
4.5 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Sonuçları.....	48
4.5.1 Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları.....	48
4.5.2 Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN) Sonuçları	49
4.6 Dönel İnce Film Fırını (RTFO) ile Kısa Dönem Yaşlandırma Deneyi Sonuçları	51
4.7 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları	56
4.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları.....	57
4.9 Optimum Katkı Yüzdesinin Belirlenmesi.....	60
4.10 Maliyet Analizi	61
5. SONUÇLAR.....	63
6. KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

m	Metre
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
°C	Santigrad Derece
%	Yüzde
δ	Faz Açısı
G*	Kompleks Kayma Modülü
G	Kayma Modülü
G*/sin δ	Tekerlek İzi Parametresi

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
CA	Cam Atık
CRMB	Kırıntı Kauçuk Modifiye Bitüm
EVA	Etilenvinil Asetat
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HK	Hibrit Karışım (CA + PPA)
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
MB	Modifiye Bitüm
MC	Orta Kurlenme
PET	Polietilen Tereftalat
PI	Penetrasyon İndeksi
PMA	Polimer-Modifiye Asfalt
PMB	Polimer Modifiye Bitüm
PP	Polipropilen
PPA	Plastik Poşet Atık
PS	Polistiren
PVC	Polivinil Klorür
PVN	Penetrasyon Viskozite İndeksi
RC	Hızlı Kurlenme
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
SB	Saf Bitüm
SBR	Styren-Butadien Kauçuğu
SBS	Styren-Butadien-Styren
SC	Yavaş Kurlenme
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Ham Petrol damıtma işlemi.....	4
Şekil 2.2 Tam derinlikli geleneksel esnek yol üstyapısı.	12
Şekil 2.3 Beton Kaplama Yol Kesiti.	13
Şekil 2.4 İnşaat plastikleri ile modifiye edilmiş asfalt kaplamanın kuru işlem süreci. ..	18
Şekil 2.5 Plastik katkılı asfalt kaplamanın yaş yöntemle üretimi.....	19
Şekil 3.1 Kullanılan atık malzemeler.	33
Şekil 3.2 Siyah plastik poşetin 5*5 mm ² boyutlarda kesilme aşamaları.	33
Şekil 3.3 Cam şişelerin öğütülme aşamaları.	33
Şekil 3.4 Modifiye Bitüm Üretim Süreci.	36
Şekil 3.5 Bitüm RTFOT deney aşamaları, a) Boş şişenin darasının alınması, b) Bitüm ağırlığı, c) Numunelerin RTFOT cihazına yerleştirilmesi, d) Deney sonrası durum.....	39
Şekil 4.1 Cam Tozu Atığı (CA) ve Plastik Poşet Atığı (PPA) ile Modifiye Edilen Bitümlerin Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	42
Şekil 4.2 Cam Tozu Atığı (CA) ve Plastik Poşet Atığı (PPA) ile Hibrit olarak Modifiye Edilen Bitümlerin Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.	43
Şekil 4.3 Cam tozu ve plastik poşet atık katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon deneyi sonuçları.	44
Şekil 4.4 Hibrit katkılı atık katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon deneyi sonuçları.	44
Şekil 4.5 Cam tozu ve plastik poşet atık katkılı modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası deneyi sonuçları.	45
Şekil 4.6 Hibrit atık katkılı modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası deneyi sonuçları.	45
Şekil 4.7 135°C ve 165°C'de 5 Farklı CA Oranı ile Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.	46
Şekil 4.8 135°C ve 165°C'de 5 Farklı PPA Oranı ile Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.	47
Şekil 4.9 135°C ve 165°C'de 5 Farklı Hibrit Karışım (HK) Oranı ile Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.	48
Şekil 4.10 Plastik atığı katkılı modifiye bitüm ve Cam tozu atığı katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksi grafiği.	49
Şekil 4.11 Hibrit atık katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksi grafiği.	49
Şekil 4.12 PPA katkılı modifiye bitüm ve CA katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon viskozite numarası (PVN) grafiği.	50

Şekil 4.13 Hibrit katkılı modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon viskozite numarası (PVN) grafiği.....	50
Şekil 4.14 PPA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.....	51
Şekil 4.15 CA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.....	52
Şekil 4.16 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.....	52
Şekil 4.17 PPA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.....	53
Şekil 4.18 CA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.....	54
Şekil 4.19 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.....	54
Şekil 4.20 PPA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.....	55
Şekil 4.21 CA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.....	55
Şekil 4.22 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.....	56
Şekil 4.23 CA ve PPA ile modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson deney sonuçları.....	56
Şekil 4.24 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin Nicholson deney sonuçları.....	57
Şekil 4.25 CA katkılı modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.....	57
Şekil 4.26 PPA katkılı modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.....	58
Şekil 4.27 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.....	59
Şekil 4.28 CA katkılı modifiye bitümlerin faz açısı δ ($^{\circ}$) parametresinin değişimi.....	59
Şekil 4.29 PPA katkılı modifiye bitümlerin faz açısı δ ($^{\circ}$) parametresinin değişimi.....	60
Şekil 4.30 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin faz açısı δ ($^{\circ}$) parametresinin değişimi.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 ABD'de üretilen, geri dönüştürülen ve depolanan camın bin ton cinsinden miktarı (2000-2018).....	21
Çizelge 3.1 50/70 penetrasyon dereceli bitümün malzeme özellikleri.....	34
Çizelge 3.2 Atık Malzemelerin Karışım Sürecine İlişkin Bilgiler.	35
Çizelge 4.1 Optimum katkı miktarlarının belirlenmesi.....	61
Çizelge 4.2 Maliyet analizi.....	62



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Geri dönüştürülmüş plastik içeren asfalt karışımı, Columbia, Missouri'deki U.S. Highway 63 yakınlarındaki Stadium Boulevard'ı kaplamak için kullanılmıştır..	18
---	----



1. GİRİŞ

Asfalt kaplama, eşyaların ve insanların bir yerden diğerine hareketliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. 19. yüzyılın başlarında tanıtılmasından ve ilk kez kullanılmasından bu yana, asfalt kaplama inşası ve kullanımı hızla artmış, ulaşım ağının önemli bir unsuru haline gelmiştir. Avrupa'da bulunan yolların asfalt kaplama oranı %90'dan fazladır. Bu istatistik, asfalt kaplamaya olan yaygın bağımlılığı vurgulayarak, ulaşım altyapısındaki önemini gözler önüne sermektedir.

Asfalt kaplama, petrol bazlı bitüm ile bağlanan ince ve kaba agregalardan oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda hazırlanan bu karışım, yol alanına taşınarak serilmekte ve sıkıştırılmaktadır. Trafik yükü, sıcaklık değişimleri ve nem gibi çevresel faktörlere maruz kalan asfaltın performansını, dayanıklı ve çok yönlü bir malzeme olan bitümlü bağlayıcı belirlemektedir. Kaliteli ve doğru miktarda bitümlü bağlayıcı kullanımı, dayanıklı ve verimli asfalt kaplama sağlamaktadır.

Geleneksel asfalt bağlayıcıları yaygın olmasına rağmen, son birkaç on yılda trafik yoğunluğundaki ve yükteki önemli artışlar nedeniyle yetersiz hale gelmiştir. Bu durum, asfalt kaplamaların hizmet ömrünün kısalmasına ve dolayısıyla yol bakım ve yeniden asfaltlama sıklığının artmasına yol açmıştır (Polacco vd. 2015). Bu kısıtlamayı aşmak için araştırmacılar çeşitli teknikler uygulamış ve bunlar arasında en umut verici çözümlerden biri, asfalt bağlayıcılarını modifiye etmek için polimerlerin kullanılması olmuştur. Bu polimerlerin uygulanması, asfaltın performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda ömrünü de uzatır (Behnood ve Modiri Gharehveran 2019, Emtiaz vd. 2023, Nizamuddin vd. 2021, Polacco vd. 2015, Uwanuakwa vd. 2023). Du vd. (2020) tarafından vurgulandığı gibi, bitümlü bağlayıcılarda kullanılan polimer modifikatör üç kategoriye ayrılabilir: (1) styren-butadien-styren (SBS) (Du vd. 2023, Sengoz ve Isikyakar 2008) gibi elastomerler ve styren-butadien kauçuğu (SBR) (Zhang ve Yu 2010), (2) yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) (Dalhat ve Al-Abdul Wahhab 2017), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) (Alghrafy vd. 2021, Nizamuddin vd. 2020), polipropilen (PP) (Fattah vd. 2021, Zhang vd. 2024), polistiren (PS) (Liu vd. 2020, Murana vd. 2021), polietilen tereftalat (PET) (Almahdi vd. 2021, Ben Zair vd. 2022, Ghabchi vd. 2021), polivinil

klorür (PVC) (Joni vd. 2020, Padhan vd. 2021) ve etilen-vinil asetat (EVA) (Costa vd. 2019) gibi plastomerler, ve (3) parçacık kauçuğu (Mu vd. 2020) gibi diğer dikkat çekici modifikatörlerdir.

Elastomerler, yüksek ve düşük sıcaklıklardaki mükemmel performansları nedeniyle bu kategoriler arasında en yaygın olarak benimsenenlerdir (Sengoz ve Isikyakar 2008). Özellikle, SBR ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının, benzer hatta daha iyi performansla SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcısına kıyasla, asfalt bağlayıcının tekerleklere karşı direncini, düşük sıcaklık çatlaklarını ve yorgunluk dayanımını artırdığı gösterilmiştir (Dalhat ve Al-Adham 2023, Emtiaz vd. 2023). Ancak, önemli eksiklikler de bulunmaktadır. Örneğin, kauçuk bazlı polimerler yüksek sıcaklıklarda bozulurken, asfalt içindeki çözünmelerinin zehirli gazlar saldığı tespit edilmiştir (Xiao vd. 2019). Öte yandan, SBS ile modifiye edilmiş asfalt, yalnızca ultraviyole (UV) radyasyonu, oksijen, nem, rutubet ve mekanik stres gibi atmosferik etkenlere maruz kaldığında bozulmaya meyilli değil, aynı zamanda doğal kaynakları tükettiği için pahalı ve sürdürülebilir değildir (Du vd. 2020).

Bu bağlamda, geri dönüşüm, çevresel etkileri azaltma ve doğal kaynakları koruma açısından önemli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Özellikle plastik atıkların değerlendirilmesi, hem atık yönetimi hem de malzeme performansı açısından yenilikçi çözümler sunmaktadır. Son yıllarda, geri dönüştürülmüş plastiklerin bitüm içine entegrasyonu sektörde öne çıkan bir araştırma konusu haline gelmiştir. Geri dönüştürülmüş plastik şeklindeki plastomerin, kauçuk ve termoplastik elastomerlerin alternatif olarak kullanılması, asfalta benzer bir performans sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu bitüm modifikatörlerin eksikliklerine yönelik çevre dostu ve maliyet etkin bir çözüm sunar (Xu vd. 2022). Ayrıca, plastik modifiye bitümlü bağlayıcılarının kullanımı, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma prensipleriyle uyumlu bir yaklaşım sergiler.

Polietilen (PE) ve polipropilen (PP), asfalt bağlayıcılarda en yaygın kullanılan plastik modifikasyonlarıdır. Bunun birkaç nedeni vardır. İlk olarak, bu plastikler, diğer plastik türleriyle birlikte, asfalt bağlayıcılarda ısıya, oksidasyona, ultraviyole ışınlarla, yüksek

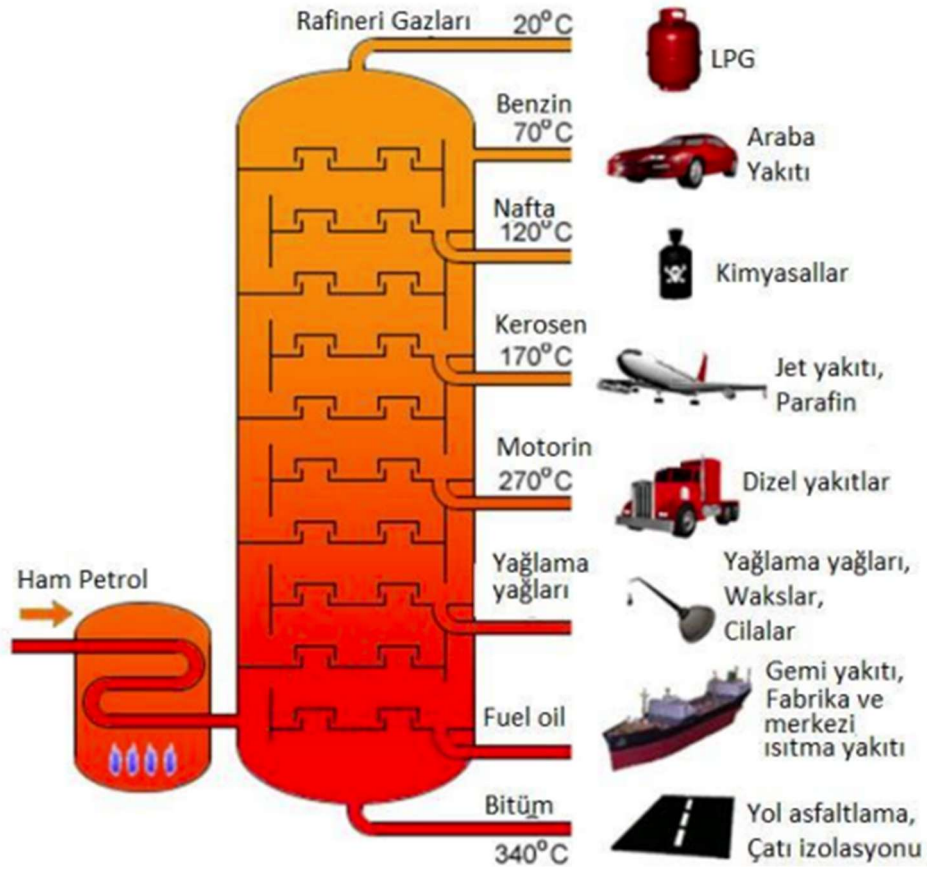
sıcaklıkta aşınmaya, dayanıklılığa ve su hasarına karşı geliştirilmiş direnç açısından iyi performans göstermiştir (Du vd. 2020, Wu ve Montalvo 2021, Xu vd. 2022). İkinci olarak, bu plastikler, 2018 yılında üretilen toplam plastik miktarının yaklaşık %48,5'ini oluşturmaktadır ve PE ile PP üretiminin sırasıyla %50 ve %30 artacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, PE (%36) ve PP (%21), 7300 Mt üretimde bulunan lif dışı plastiklerin en büyük gruplarını temsil etmektedir (Geyer vd. 2017). Ne yazık ki, bu plastiklerin geri dönüşüm oranları üretimleriyle aynı hızda artmamıştır. Örneğin, 2018'de ABD'de üretilen yaklaşık 36 milyon ton plastikten yalnızca %8'i (yaklaşık 3 milyon ton) geri dönüştürülmüş, şok edici bir şekilde %75'i (yaklaşık 27 milyon ton) çöplüklere gömülmüştür (US Environmental Protection Agency 2023). Bu nedenle, bu tür plastiklerin bitüm modifikatörleri olarak geri dönüştürülmesi ve bu suretle, plastik atıklarının imhası ve yol kaplaması üzerinde yıllar boyunca büyük bir maliyet ve çevresel etki oluşturacaktır.

Bu çalışmada, modifiye bitümlü karışımların performansını değerlendirmek amacıyla, hazırlanan numunelere çeşitli fiziksel ve reolojik deneyler uygulanmıştır. Belirlenen oranlarda üretimi sağlanan cam atık ve plastik torba atığı ile modifiye edilmiş B50/70 bitüme viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası ve özgül ağırlık deneyleri yapılarak gerekli parametreler özenle elde edilmiştir, sonrasında optimum oranlar belirlenerek hibrit oranlarına karar verilmiştir. Üretimi sağlanan cam atığı (%0, 0,5, 1,0, 1,5, 3,0, 5,0%), plastik torba atığı (%0, 0,5, 1,0, 1,5, 3,0, 5,0%) ve hibrit atık (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) ile modifiye edilmiş 15 adet modifiye bitüm ve 1 adet saf bitüme viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık, nicholson soyulma testi ve DSR deneyleri yapılmıştır. Elde edilen değerler ışığında, cam ve plastik atıklarının bitüm modifikasyonundaki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, bitümün yaşlanma direncini değerlendirmek için RTFOT (Rolling Thin-Film Oven Test) deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, RTFOT deneyi ile yaşlandırma uygulandıktan sonra, tüm numunelere tekrar viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve DSR deneyleri yapılarak modifiye bitümlerin performansı değerlendirildi. Deneysel bulgulara göre, %1 cam atığı, %3 plastik torba atığı ve 0,5 CA + 1,5 PPA serisi hibrit atık numunelerinin en iyi performansı sergiledikleri görülmüştür.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Bitüm

Ham petrol rafine edildiğinde kalan kalıntı veya yan üründür. Düz damıtma işlemi, çözücü çıkarma işlemi vb. gibi çok çeşitli rafineri işlemleri, farklı kıvamda ve diğer istenen özelliklerde bitüm üretmek için kullanılabilir. Ham petrolün kaynaklarına ve özelliklerine ve gerekli bitümün özelliklerine bağlı olarak, birden fazla işleme yöntemi kullanılabilir (Mathew ve Rao 2007) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Ham Petrol damıtma işlemi. (İnt.Kyn.1).

2.1.1 Bitüm Modifikasyonu

Bitüm, en eski mühendislik malzemelerinden biri olup, binlerce yıldır yapıştırıcı, sızdırmazlık, koruyucu, su geçirmezlik ve kaplama bağlayıcısı olarak kullanılmaktadır.

Eski dönemlerde doğal bitüm doğrudan kullanılırken, 1900'lerin başında ABD'de ham petrol rafinasyonu ile rafine bitüm üretimi başlamıştır. Bu tarihten itibaren bitüm tüketimi hızla artmış ve özellikle yol yapımında kullanılmaya devam etmiştir. 2011'de Asphalt Institute ve Eurobitume'nin ortak raporuna göre, yıllık bitüm tüketimi dünya genelinde yaklaşık 102 milyon ton olup, bunun %85'i çeşitli kaplama türlerinde kullanılmaktadır. Bitümün kimyasal bileşimi karmaşık olup, ham petrol kaynakları ve rafinaj süreçlerine bağlı olarak değişirken, kaliteli ham petrol ve uygun rafinaj yöntemleri iyi bitüm elde edilmesini sağlar. Ancak, petrol kaynaklarının sınırlılığı ve rafinajdaki kontrol eksiklikleri nedeniyle, endüstriler giderek bitüm modifikasyonuna yönelmektedir (Polacco vd. 2006).

2.1.2 Bitümlü Malzemeler

Bitümlü malzemeler veya asfaltlar, yol yapımında yaygın olarak kullanılır, öncelikle mükemmel bağlayıcı özellikleri ve su geçirmezlik özellikleri ile nispeten düşük maliyetleri nedeniyle. Bitümlü malzemeler, esas olarak petrol veya doğal bitümün damıtılmasından elde edilen yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşan, yapışkan özelliklere sahip ve karbon disülfürde çözünen siyah veya koyu renkli katı veya viskoz çimentolu bir madde olan bitümden oluşur (Mathew ve Rao 2007). Diğer bağlayıcı türleri katran, kesit, emülsiyon, modifiye bağlayıcılardır.

- i. Katranlar: Bunlar kömür, odun veya petrol gibi organik maddelerin yıkıcı damıtılmasından elde edilen kalıntılardır ve bitümden daha sıcaklığa duyarlıdır.
- ii. Kömür Katranı: Bu, kok yapmak için kömürün damıtılmasının sıvı yan ürünüdür. Bu işlemin gaz halindeki yan ürünü genellikle şehir gazı olarak bilinir. Ahşap direkleri ve traversleri, demir direkleri kaplamak için kullanılır.
- iii. Odun Katranı: Bu, reçineli odunun damıtılmasıyla elde edilir. Odun katranı kreozot içerir ve güçlü koruyucu özelliklere sahiptir.
- iv. Mineral Katranı: Bu, bitümlü şistin damıtılmasıyla elde edilir.
- v. Kömür Katranı Zifti: Bu, kömürün yüksek sıcaklıkta karbonizasyonu ile üretilen ham katranın doğrudan damıtılmasının kalıntısıdır. Duvarcılık, çelik ve kereste yapılarında su yalıtım bileşiği olarak kullanılır. Ayrıca beton yapıların su

yalıtımında da kullanılır. Bitüm, katranın aksine petrol yağlarında çözünecektir. (Sertakar 2008).

2.1.3 Bitüm Çeşitleri

Bitümün farklı formları aşağıda açıklanmaktadır:

- i. **Katbek Bitüm:** Normal uygulama, viskozitesini azaltmak için bitümü ısıtmaktır. Bazı durumlarda, katbek bitüm gibi sıvı bağlayıcıların kullanılması tercih edilir. Katbek bitümde, bitümün viskozitesini düşürmek için uygun çözücü kullanılır. Çevresel açıdan da katbek bitüm tercih edilir. Bitümlü malzemedeki çözücü buharlaşacak ve bitüm agregayı bağlayacaktır. Katbek bitüm, soğuk havalarda bitümlü yol yapımı ve bakımı için kullanılır. Katbek bitümün hazırlanmasında kullanılan damıtıklar nafta, gazyağı, dizel yağı ve fırın yağıdır. Hızlı Kürlenme (RC), Orta Kürlenme (MC) ve Yavaş Kürlenme (SC) gibi farklı katbek bitüm türleri vardır. RC, yüzey kaplama ve yama işlemleri için önerilir. MC, daha az miktarda ince agrega içeren ön karışım için önerilir. SC, önemli miktarda ince agrega içeren ön karışım için kullanılır. (Umar ve Ağar 1991).
- ii. **Bitüm Emülsiyonu:** Bitüm emülsiyonu, bitümün sulu bir ortamda ince bir şekilde bölünmüş halde süspansiyon edildiği ve uygun bir malzeme ile stabilize edildiği sıvı bir üründür. Hindistan'da normalde katyonik tip emülsiyonlar kullanılır. Emülsiyondaki bitüm içeriği yaklaşık %60'tır ve geri kalanı sudur. Emülsiyon yola uygulandığında parçalanarak su salınır ve karışım sertleşmeye başlar. Sertleşme süresi bitümün derecesine bağlıdır. Bitümlü emülsiyonların viskozitesi IS: 8887 – 1995'e göre ölçülebilir. Üç tip bitümlü emülsiyon vardır: Hızlı Sertleşen (RS), Orta Sertleşen (MS) ve Yavaş Sertleşen (SC). Bitüm emülsiyonları, tepe yol yapımı için ideal bağlayıcılardır. Bitümün veya agregaların ısıtılmasının zor olduğu durumlarda, yüzey kaplama işleri için hızlı sertleşen emülsiyonlar kullanılır. Orta sertleşen emülsiyonlar, ön karışım işleri ve yama onarım işleri için tercih edilir. Yağmurlu mevsimde yavaş sertleşen emülsiyonlar tercih edilir. Bitümlü astarda, damıtık madde yayıldığı 8 yol yüzeyi

tarafından emilir. Bu nedenle emilim, yüzeyin gözenekliliğine bağlıdır. Bitümlü astarlar, stabilize edilmiş yüzey ve suyla bağlı makadam taban kurslarında faydalıdır. Bitümlü astarlar genellikle yol şantiyelerinde penetrasyon bitümünü petrol damıtığıyla karıştırarak hazırlanır. (Arıkan 1997)

iii. **Modifiye Bitüm:** Bitüm modifiye ediciler adı verilen belirli katkı maddeleri veya katkı maddelerinin bir karışımı, Bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerini iyileştirebilir. Bu modifiye edicilerle işlenmiş bitüme modifiye bitüm denir. Polimer Modifiye Bitüm (PMB) veya Kırıntı Kauçuk Modifiye Bitüm (CRMB), aşırı iklim değişikliklerinin gereksinimlerine bağlı olarak yalnızca aşınma kursunda kullanılmalıdır. Modifiye bitüm için ayrıntılı özellikler IRC tarafından yayınlanmıştır: SP: 53- 1999. PMB ve CRMB'nin performansının, inşaat sırasında sıcaklığın sıkı bir şekilde kontrol edilmesine bağlı olduğu unutulmamalıdır. (Karacasu 2015).

Mathew ve Rao'ya (2007) göre, modifiye bitüm kullanmanın avantajları şunlardır:

- i. Günlük ve mevsimsel sıcaklık değişimlerine karşı daha düşük duyarlılık
- ii. Yüksek kaplama sıcaklığında deformasyona karşı daha yüksek direnç
- iii. Daha iyi yaşlanma direnci özellikleri
- iv. Karışımlar için daha yüksek yorulma ömrü
- v. Agregata ve bağlayıcı arasında daha iyi yapışma
- vi. Çatlama ve yansıtıcı çatlamanın önlenmesi

2.1.4 Bitümün Fonksiyonel Gereksinimleri

Bitümün istenen özellikleri karışım türüne ve yapısına bağlıdır. Genel olarak, bitüm aşağıdaki istenen özelliklere sahip olmalıdır. Bitüm yüksek sıcaklığa duyarlı olmamalıdır; en sıcak havalarda karışım çok yumuşak veya dengesiz olmamalı ve soğuk havalarda karışım çatlaklara neden olacak kadar kırılgan olmamalıdır.

- i. Bitümün karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki viskozitesi yeterli olmalıdır. Bu, uygun sınıflardaki kesme veya emülsiyonların kullanılmasıyla veya bitümün ve agregaların karıştırılmadan önce ısıtılmasıyla elde edilebilir.
- ii. Karışımda kullanılan bitüm ve agregalar arasında yeterli afinite ve yapışma olmalıdır (Mathew ve Rao 2007).

2.1.5 Bitümün Özellikleri

- i. Yapışma: Bu, bitümün sıvı halde katı bir yüzeye yapışma yeteneğidir yüzeyin doğasına bağlı olarak.
- ii. Suya Direnç: Bitüm suya dayanıklıdır
- iii. Viskozite ve Akış: Bitümün Viskoz veya akış özellikleri, hem işleme ve uygulama sırasında yüksek sıcaklıkta hem de bitümün hizmet sırasında maruz kaldığı düşük sıcaklıkta önemlidir.
- iv. Yumuşama Noktası: Bu, test düzeneği bilinen bir oranda ısıtıldığında çelik bilyenin bitümden bilinen bir mesafeye düştüğü sıcaklıktır.
- v. Sertlik: Bitümün sertliğini ölçmek için, bir penetrasyon testi yapılır bu, belirli bir sıcaklıkta, belirli bir süre sonra bitümdeki ağırlıklı bir iğnenin penetrasyon derinliğini mm'nin onda biri cinsinden ölçer.
- vi. Süneklik: Süneklik testi, bitümün yapışkan özelliğinin bir ölçüsünü verir ve esneme kabiliyetini verir. Esnek kaplama tasarımında, bağlayıcılar agregaların etrafında ince bir sünek film oluşturmalıdır, böylece agregaların fiziksel olarak birbirine kenetlenmesi iyileştirilir. Yetersiz sünekliğe sahip bağlayıcı malzemeler tekrarlanan trafik yüklerine maruz kaldığında çatlar ve geçirgen kaplama yüzeyi sağlar.

2.2 Yol Kaplamaları

Antik çağlarda, insanların beslenme ve su içme yerlerine ulaşmak için kullandıkları seyrek bir patika yol ağından başka bir şey yoktu. Bu patika yollar, aynı amaç için diğer canlıların yaptığı patikalardan yalnızca biraz farklıydı; tek fark, kayalar gibi engellerin daha önemli rotalardan kaldırılması ve dikenli çalıkların insanlar tarafından budanmasıydı.

Bu basit patikalardan daha ayrıntılı iletişim hatları, belirli bölgelerdeki insan sayısının artması ve toplulukların sosyal yapısı ve organizasyonu, topluluklar arasında daha kalıcı bir temas talep edene kadar ortaya çıkmadı. Böylece yollar, insan grupları seyahat ederek, iş yaparak, kavga ederek vb. birbirleriyle etkileşime girmeye başladığında ortaya çıktı. Bu, MÖ 3500 civarında tekerleğin icadı ve savaş arabaları ile vagonların geliştirilmesiyle gerçekleşti (Jenkins ve Collins 2016).

Tekerlekli trafiğe uygun asfalt yolların en eski kayıtları MÖ 2200 civarında Babil'de (modern Irak), MÖ 1500 civarında Girit'te ve MÖ 540 civarında Mısır'da bulunmuştur. Avrupa'da ilk önemli yollar Romalılar tarafından inşa edilmiştir. 100.000 km'den fazla bir yol ağı MÖ 400 ile MS 400 yılları arasında inşa edilmiştir. Roma yolları yağmur suyunu akıtmak için eğimliydi ve yükseltilmiş taş bordürler arasına inşa edilmişti. Romalılar uzak çağların en iyi yol inşaatçılarıydı. Savaş oyunları ile elde edilen fetihler bunun nedenlerinden biriydi. Romalılar fethettikleri tebaa uluslarını kontrol etmek için iyi bir yol ağına ihtiyaç duyuyorlardı. Ordunun isyan eden grupları bastırmak için hızlı hareket edebilmesi gerekiyordu (Jenkins ve Collins 2016). Roma yolları, alt zemine bağlı bir temel sistemiyle Arnavut kaplamaydı. Dört katmanlı bir sistem geliştirdiler:

- i. Üst katman veya yüzey
- ii. Taban katmanı
- iii. Alt taban bazen tabanda stabilize edilmiş bir malzeme ile
- iv. Alt zemin

Roma İmparatorluğu çökünce, yol yapıları bozulmaya başladı. Napolyon, 18. yüzyılın sonu ve 19. yüzyılın başında Avrupa'da önemli bir yol ağının inşasından sorumluydu. 1747'de Fransa, Paris'te "Ecole des Pontset Chaussess" kuruldu. 1765'te Tresaguet, Roma yol yapısını daha da geliştirdi. Temel ilkesi, ilk katmanı büyük bloklarla inşa etmek ve ardından aralarına küçük taşlar yerleştirmektir. Bunu yaparak, ilk katmanın alt zeminde daha iyi yük dağılımı elde etmek için sürekli olarak basınç gerilimlerine maruz kalmasını sağlamaya çalıştı. Aynı zamanda, yaklaşık 1810'da İngiltere'de Telford ve Metcalf gibi kişiler, şunlar da dahil olmak üzere değerli gelişmeler kaydettiler:

- i. Drenaj tasarımı,
- ii. Yol eğiminin tasarımı ve
- iii. Aktif ve düzenli bakım.

Telford ve Metcalf, drenaj tasarımı ve çapraz düşüşün dahil edilmesiyle bakımın önemli ölçüde azaltılabileceğini ve gerekli katman kalınlığının önemli ölçüde azaltılabileceğini buldular. Büyük Britanya'da, sanayi devrimi malzeme ve malların hareket ihtiyacını karşılamak için bir yol yapım programı gerektirdi ve çeşitli yollarla ihtiyaçları karşılamak için kilometrelerce yol inşa edildi. Bu süre zarfında, John Macadam (1756-1836) aşağıdaki gibi bir yol yapım yöntemi icat etti: yol yatağının (veya alt tabakanın) dikkatli bir şekilde hazırlanması ve boşaltılmasından sonra, 25 cm'lik bir taş tabakası (bir adamın ağzına sığabilecek bir boyut) döşedi ve ardından daha küçük taşlarla yüzey oluşturdu. Bu tür yol, kullanım açısından hayvanların çektiği vagonlar ve arabalar için idealdi ve yapımı ucuzdu. John Macadam'ın yolları trafiğe karşı iyi dayandı ve birçok İngiliz yolu "makadamize edildi". On dokuzuncu yüzyılda demir jantlar, yani paletler için iyi bir çözümdüler. Ancak, motorlu ulaşımın (Siegfried Marcus, Viyana'da çekişli ilk arabayı icat etti) ve kauçuk lastiklerin (Dunlop, 1888'de) icadı gereksinimleri bir kez daha değiştirdi. Hızlar arttı ve bu da güvenliği önemli bir husus haline getirdi. Kauçuk tekerlekli tekerlekler, yol yüzeyinden tozu "emdi", taşları gevşetti ve kör edici toz bulutları oluşturdu. Bu nedenle, 20. yüzyılın başlarında, taşları yerinde tutmak ve tozu önlemek için yol yüzeyine katran yayıldı. Kum, taş ve katran bir "yüzey kaplaması" oluşturdu. Daha sonra, taşla kaplanmış ve pürüzsüz bir yüzeye yuvarlanmış "katran makadam" yüzeyi kullanıldı, dolayısıyla asfalt terimi gündeme geldi. Bugün hala su bağlı makadam ve penetrasyon makadamı (bitüm emülsiyon bulamacı kullanılarak) ve ısısının bir çeşidi olan asfalt üretiyoruz. Temel performansının, maliyetle ilgili olarak yol kullanıcılarına sağlanan hizmetin temeli olarak tanımlanması gerekiyordu. Bu, kullanıma uygunluğun göstergesidir. Performansın ayrıca daha iyi anlaşılması ve tahmin edilebilir olması gerekiyordu. Bu, yapısal davranış ve zamanla kaplamanın bozulması hakkında bilgi ve araştırma gerektiriyordu. Bu, AASHO yol testini motive etti. AASHO Yol Testi, 1956 ile 1958 yılları arasında Chicago'nun yaklaşık 100 km güneybatısındaki Ottawa, Illinois'de gerçekleştirildi. Kamyonların bulunduğu kapalı devre bir test pistinde yol bozulması, trafik ve kaplama yapısının bileşimi arasındaki karmaşık etkileşimi sistematik

olarak ölçmek muazzam bir çabaydı. AASHO, American Association of State Highway Officials'ın kısaltmasıdır ve daha sonra AASHTO (Highway and Transportation) oldu. AASHO yol testinin amaçları hala çok önemlidir ve şunlardır:

- i. Trafiğin artan taleplerini karşılamak için tatmin edici yol tasarım prosedürleri geliştirmek.
- ii. Yasa koyucuların kullanıcı vergilendirmesi ve araç boyutu ve ağırlığının kontrolü konusunda yardımcı olmak
- iii. Mevcut Hizmet Edilebilirlik Endeksi (PSI)
- iv. Yük eşdeğerliği

Modern dünyada, hastanelere ulaşım, itfaiye ve acil durumlara hızlı erişim, arkadaş ziyaretleri ve turizm gibi sosyal faktörlerin yanı sıra, iyi bir yol sisteminin her türlü ekonomik faaliyetin omurgasını oluşturduğu iyi bilinmektedir. Yeni çay alanlarında yol geliştirme çalışmaları, çeşitli Dünya Bankası ve ikili kredi planları kullanılarak üstlenilmiştir. Bu tür kredilerin çekiciliği, çaydan elde edilen ulusal gelirin artması nedeniyle haklı gösterilebilmesidir. Kırsal yolların inşası, yol mühendisliğinin yalnızca bir yönüdür. Bir diğer yönü ise bakımdır. Tüm yolların bakımı yapılmalıdır ve bu bakım yapılmazsa, tüm yollar içsel sürdürülebilir değerini kaybeder. Yollar bir ülke için önemli varlıklardır ve en uzun kullanım ömrünün elde edilmesini sağlamak için bir bakım programına ihtiyaç duyarlar. Bu bakım planının hazırlanması ve uygulanması aşamasında halk ile birlikte hareket edilip daha uzun ömürlü yol kaplamalar haline getirilebilir. Gelişmekte olan ülkelerde, bağış karşılığında çukurları doldurmaya yönelik yerel topluluk programları gibi girişimler daha ciddiye alınmayı ve değer görmeyi hak ediyor (Jenkins ve Collins 2016).

2.2.1 Yol Kaplama Çeşitleri

Yol üstyapıları üç ana türe ayrılabilir: Esnek yol üstyapıları (kaplama üst katmanları); rijit yol üstyapıları (beton kaplama) ve kompozit yol üstyapıları (altta beton kaplama üstünde daha ince asfalt kaplama şeklinde) (Kök 2008).

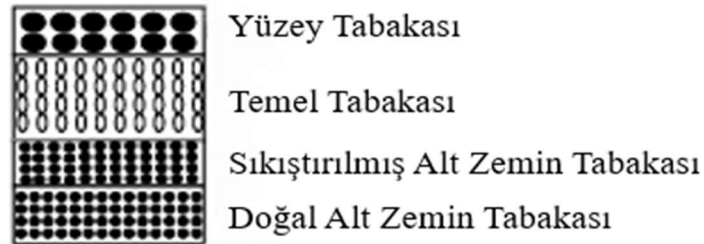
2.2.1.1 Esnek Yol Üstyapıları

Bu, birkaç katmandan oluşan bir yoldur ve asfalt veya bitümlü malzeme ve agregaların, taban zeminin üzerine katmanlar halinde uygun kalitede sıkıştırılmış granüler malzeme yatağına yerleştirildiği bir yol üstyapısı olarak tanımlanabilir. Suyla bağlı makadam yollar ve asfalt kaplamalı veya kaplamasız stabilize toprak yollar bu yapıların bir örneğidir. Esnek yol kaplamalar, yüzey, temel, alt temel ve sıkıştırılmış alt zeminden oluşur; bu tür yol üstyapısı, yerel malzemelerin bulunmadığı alanlarda oldukça popülerdir, yani bölgede sınırlı temel ve alt temel agregaları mevcuttur (Jenkins ve Collins 2016).

Bu tip yol yapısı, yerel malzemelerin bulunmadığı alanlarda oldukça popülerdir, yani bölgede sınırlı taban ve alt taban agregaları mevcuttur. Tam derinlikte asfalt yolların avantajları şunlar olabilir:

- i. Suyu hapseden geçirgen katmanlara sahip değildir (granüler katmanlar gibi)
- ii. İnşaat için gereken süre nispeten düşüktür. Özellikle yakın trafik akışının karşılanması gereken genişletme projelerinde faydalıdır
- iii. Kalın katmanlara yerleştirildiğinde, inşaat sezonu çok sınırlı değildir
- iv. Asfalt kaplamalar yolda düzgünlük sağlar ve korur

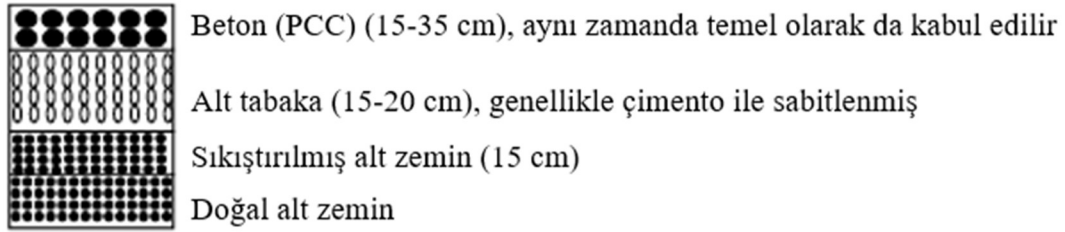
Bu tür kaplama yapılarının altındaki alt zeminlerde nem içeriğinin birikmediği ve alt zemin mukavemetinde küçük veya önemsiz bir azalmaya neden olduğu görülmektedir (Jenkins ve Collins 2016). Şekil 2.2’de tam derinlikli geleneksel yol üstyapısı kesiti görülmektedir.



Şekil 2.2 Tam derinlikli geleneksel esnek yol üstyapısı (İnt.Kyn.2).

2.2.1.2 Rijit Yol Üstyapısı

Bu, betondan yapılmış herhangi bir yol yüzeyi için kullanılan teknik terimdir ve genellikle havaalanları ve büyük otoyollar inşa etmek için kullanılır. Genellikle ağır hizmet tipi endüstriyel zemin levhaları, liman ve liman sahası döşemeleri ve ağır araç parkı veya terminal döşemesi olarak kullanılırlar. Sert bir döşemenin tipik bir kesiti şudur: Beton Döşeme Beton (CPC) (15 – 35 cm), ayrıca temel alt temel katmanı (15-20 cm) olarak da kabul edilir, genellikle çimento ile sıkıştırılmış alt temel (15 cm) doğal alt temel (Jenkins ve Collins 2016). Şekil 2.3’de tipik bir beton kaplama yol kesiti görülmektedir.



Şekil 2.3 Beton Kaplama Yol Kesiti (İnt.Kyn.3).

Beton kaplamaların farklı tipleri vardır, bunlar şunlardır:

- i. Derzli düz kaplama
- ii. Derzli takviyeli kaplama
- iii. Sürekli takviyeli kaplama
- iv. Ön gerilimli kaplama

Düz beton kullanıldığında, pompalamanın hesaba katılması özellikle önemlidir. Pompalamanın kontrolü çok önemlidir, aksi takdirde betonun altında boşluklar oluşur ve destek kaybı kaplamanın çökmesine neden olur. Pompalamanın oluşması için üç faktör aynı anda etki etmelidir:

1. Beton levhanın altındaki malzeme doymuş olmalıdır, yani serbest suyla
2. Ağır tekerlek yüklerinin sık geçişi
3. Beton levhanın altındaki malzeme aşınabilir olmalıdır.

2.2.2 Diğer Yol Yapıları

Sağlam kaplama tasarım sistemlerinin prensipleri (çoğunlukla mekanik) her türlü yapının kendine özgü gereksinimleri için kullanılabilir. Bazı örnekler şunlardır:

- i. Endüstriyel alanlar
- ii. Limanlar (depolama alanları, konteyner depoları, forklift kaplamaları)
- iii. Pistler, taksi yolları, havaalanlarındaki apronlar
- iv. Demiryolları
- v. Setler vb.

İlkeler aynı kalır, ancak örneğin yükler normal kaplama yüklemesinden farklıdır. Örneğin, endüstriyel alanlarda birbiri üzerine istiflenmiş konteynerlerin statik yükleri olabilir (Jenkins ve Collins 2016).

2.3 Atık Malzemeler

Katı atık yönetimi, çevre üzerindeki etkisi nedeniyle küresel olarak ve Türkiye'de büyük bir endişe kaynağıdır. Katı atıkların uygun şekilde bertarafı ve geri dönüşümü, kirliliği azaltmak ve doğal kaynakları korumak için çok önemlidir. Bu sorunu ele alma çabaları, halk sağlığını korumak ve ekolojik dengeyi sürdürmek için esastır. Plastik atıklar, yeraltı ve deniz suyunu kirleten mikroplastiklere parçalandığı için çevre üzerinde zararlı etkilere sahiptir. Bu kirlenme daha sonra bitkilerin, deniz yaşamının ve hatta insanların sağlığı için bir tehdit oluşturmaktadır (Zhang vd. 2017, Ogonowski vd. 2018, Yurtsever 2019, Zolotova vd. 2022). Mikroplastik olarak bilinen 5 mm'den küçük plastik parçacıkları, küresel ölçekte suda, havada, toprakta ve çok çeşitli canlı organizmalarda keşfedilmiştir. Parçacıklar insanlar tarafından düzenli olarak solunmakta ve yutulmaktadır. Bu durum nedeniyle sağlık risklerinin uzmanlar tarafından kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bireylerin sağlığı üzerindeki etkiyi kapsamlı bir şekilde değerlendirmek ve olası riskleri azaltmak için uygun önlemler almak önemlidir (Ogonowski vd. 2018, Zolotova vd. 2022).

Ek olarak, bu tür atıklar için geri dönüşüm süreci oldukça maliyetli olabilir ve ayrıca çevresel endişeleri artıran karbon emisyonlarının salınmasına yol açabilir. Bu, belirli atık türünü yönetmek için sürdürülebilir çözümler bulmada bir ikilem yaratır. Gelişmiş ülkeler, çeşitli faktörler nedeniyle zorlu atıkların işlenmesi yükünü giderek daha düşük gelirli ülkelere aktarmayı tercih ediyor. Bu ülkelerde, bu tür atıklar genellikle geri dönüştürülmek yerine yakılıyor ve bu da daha fazla karbon emisyonuna yol açıyor. 2004'ten bu yana, Avrupa Birliği üyesi ülkelere üye olmayan ülkelere ihraç edilen katı atık hacmi şaşırtıcı bir şekilde %77 oranında artarak yaklaşık 33 milyon ton gibi şaşırtıcı bir toplamla sonuçlandı. Plastik ve cam atıklar en yaygın atık türleridir. Bu durum, bu atıkların çeşitli amaçlarla yol yapımında yeniden kullanılması seçeneğini geri dönüşümden daha da avantajlı hale getiriyor. Maliyet açısından etkili bir değiştirici kullanmak, yol kaplamalarının reolojik özelliklerinin artırılmasını kolaylaştırır, böylece operasyonel ömürleri uzatılır, bakım ve onarım gerekliliği azaltılır ve atık birikimiyle ilişkili çevresel riskler ve mekânsal sınırlamalar etkili bir şekilde ele alınır. Bitümlü karışımlarda değiştirici olarak atık plastiğin kullanılması, yalnızca karışımın özelliklerini iyileştirmekle kalmayacak, aynı zamanda ulusları etkileyen plastik atık bertaraf sorunlarını çözecek, böylece sanitasyon sistemlerini iyileştirecek ve ayrıca toplayıcıları için istihdam yaratacaktır. (Kwame vd. 2015, Gökalp 2021, Victory 2022). Karayolu yetkilileri tarafından sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi, kaplamaların neden olduğu olumsuz çevresel etkileri etkili bir şekilde azaltmayı ve aynı zamanda daha uygun maliyetli yatırım kararları almayı amaçlamaktadır (Wu vd. 2017). Sürdürülebilir kaplamaların başarısı büyük ölçüde uygun malzemelerin titizlikle seçilmesine dayanmaktadır. Bitümün yol kaplama davranışındaki rolü, kaplamadaki nispeten düşük oranına (yaklaşık %5 ila %7) rağmen son derece önemlidir (Kaya 2018).

2.3.1 Geri Dönüştürülmüş Plastikler

Plastikler, kullanım ömürlerinin sonunda atıldıklarında atık haline gelirler. Tüketici ve endüstriyel plastik atıklarının büyük miktarda üretilmesi, küresel çevre üzerinde büyük bir yük oluşturmaktadır. Örneğin, 2018'de Çin'in kargo teslimat endüstrisi yaklaşık 5,3 milyar plastik torba ve 24,5 milyar plastik torba kullandı. Çin'de yıllık kullanılan ambalaj bandı, dünyayı 1.077 kez dolaşabilir (Brooks vd. 2018). Literatüre göre, 2017-2018

döneminde Avustralya'nın Victoria eyaletinde 585.200 ton plastik malzeme atık olarak değerlendirildi, bunun 448.000 tonu (yüzde 76,6) çöp depolarına, 130.000 tonu (yüzde 22,2) düzenli olarak geri dönüştürüldü ve 7.200 tonu enerji geri kazanımı için yakıldı (Victoria, tarihsiz). Kullanılan plastik ürünlerin büyük miktarı nedeniyle, plastik atıkların bertarafı da büyük miktarda enerji tüketmektedir. Plastiklerin geri dönüştürülmesi, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için açık bir ihtiyaçtır. Plastik atıkların yol yapımında kullanılması konusundaki tartışmalar geçen yüzyılda başladı (Schroeder 1994). Yol mühendisleri, hükümetler ve yol otoriteleri tarafından "sürdürülebilir" olmaya yönelik son zamanlardaki baskıya uyarak, polimer içeren atık malzemelerin yol kaplaması malzemesi olarak yeniden kullanılmasını aktif olarak araştırmaya başladılar (M. T. Rahman vd. 2020).

1960-2018 yılları arasında üretilen plastik atık miktarı (binlerce ABD tonu cinsinden), Amerikan Kimya Konseyi'nden (ABD EPA 2017) alınan birincil veri kaynağına dayanarak 90 katından fazla artmıştır. 2018 yılında, 35,7 milyon ton atık plastik üretildi ve bu, belediye katı atık (BSA) üretiminin %12,2'sini oluşturdu. Ancak, yalnızca %8,7'si, yani yaklaşık 3 milyon ton geri dönüştürüldü. 5,6 milyon ton plastik yakıldı ve bu, enerji geri kazanımı ile yakılan tüm BSA'nın %16,3'ünü oluşturdu. Toplamda 27 milyon ton plastik çöp sahasına gitti ve bu, tüm BSA çöp sahalarına gidenlerin %18,5'ini oluşturdu.

2.3.1.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Malzeme geri dönüşümü, enerji tasarrufu ve malzeme koruma potansiyeline sahip olup çevreye fayda sağlayabilir. Yol inşaat sektöründe, atık plastiklerin veya diğer geri dönüştürülebilir malzemelerin asfaltın yerini kısmen alması için kullanımı giderek artmaktadır (J. Li vd. 2019). Bu sürecin çevre dostu olup olmadığını değerlendirmek için, yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmak ve sera gazı emisyonu ve diğer çevresel göstergeler açısından bu uygulamanın çevresel etkilerini değerlendirmek gerekmektedir (Giustozzi vd. 2012). Yaşam döngüsü değerlendirmesi, ham madde temininden üretim ve kullanım aşamalarına ve nihayetinde atık yönetimine kadar bir ürünün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini ve kaynak tüketimini değerlendirmek için kullanılan bir araçtır (Finnveden vd. 2009). Bu atık malzemelerin yol kaplama uygulamalarında

kullanımının potansiyel çevresel etkilerini daha iyi anlamak için çeşitli Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışmaları yürütülmüştür (João Santos vd. 2015). Zhu vd. (2012), ıslak ve kuru işlem kauçuk modifikasyonunu geleneksel ve poli (stiren-bütadien-stiren) SBS modifiye karışımlarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir (Zhu vd. 2014). Islak işlem kauçuk modifikasyonu, geleneksel (asfalt tesislerinde karışım üretiminden önce üretilen kauçuk modifiye asfalt bağlayıcısı) ve terminal karışımları (asfalt terminallerinde üretilen ve karışım üretimi için tesislere taşınan kauçuklaştırılmış asfalt bağlayıcısı) olarak ikiye ayrılmıştır. Kuru işlem, transpolioktenamer veya TOR adı verilen bir extender yağ katkı maddesi içermiştir. Ham madde üretimi/temini aşamasında, SBS modifiye karışımı, geri dönüştürülmüş kauçuk kullanımına kıyasla SBS üretiminin yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle çok daha yüksek enerji tüketimi göstermiştir. Bununla birlikte, daha yüksek üretim sıcaklıkları nedeniyle sera gazı emisyonları kauçuk modifiye karışımlar için biraz daha yüksek olmuştur.

2.3.1.2 Plastikle Modifiye Edilmiş Asfalt

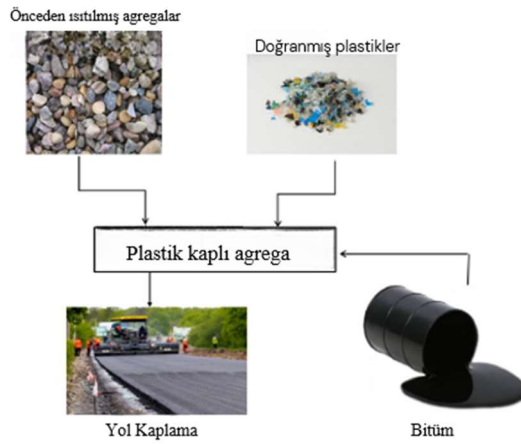
Modifiye asfaltın yol kaplamalarında kullanımı, kaplama performansına olumlu etkileri ve sürdürülebilir doğası nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Modifikasyon için birçok malzeme kullanılabilir. Bunlar arasında ömrünü tamamlamış lastikler (öğütülmüş lastik kauçuğu, GTR olarak), eski kaplama (Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama, RAP olarak) ve Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kiremitleri (RAS) bulunmaktadır (Copeland 2011). Atık plastikler, asfalt kaplamalarda asfalt bağlayıcıların yerine kullanılacak ve aynı zamanda atık plastiklerin bertaraf ihtiyacını ortadan kaldıracak bir başka polimer kaynağıdır. Yaygın olarak kullanılan atık plastikler arasında polietilen tereftalat (PET) (W. M. N. W. A. Rahman ve Wahab 2013), polietilen (PE) (Kakar vd. 2021), polivinil klorür (PVC) (Köfteci vd. 2020) ve polistiren (PS) 6 (Padhan vd. 2020) bulunmaktadır. Birçok çalışma, plastik ilavesinin kaplama performansını iyileştirebileceğini göstermiştir (Brasileiro vd. 2019). Plastik modifiyeli kaplamalar tasarlanmış ve Resim 2.1'de gösterildiği gibi sahada uygulanmıştır.



Resim 2.1 Geri dönüştürülmüş plastik içeren asfalt karışımı, Columbia, Missouri'deki U.S. Highway 63 yakınlarındaki Stadium Boulevard'ı kaplamak için kullanılmıştır (İnt.Kyn.4).

Kuru işlem

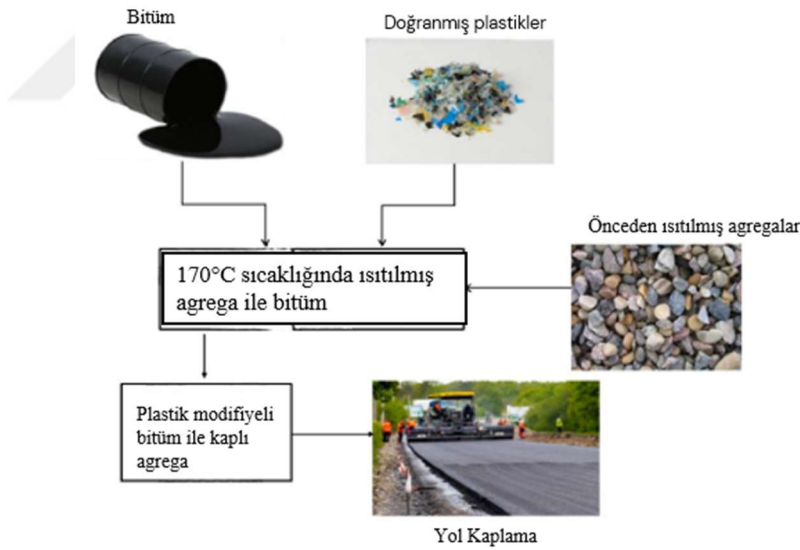
Atık plastiklerin asfalt kaplamaya entegrasyonu iki şekilde gerçekleştirilebilir: kuru işlem ve ıslak işlem. Kuru işlemde, geri dönüştürülmüş plastikler, agregat karışımına ya kısmi agregat ikamesi olarak ya da karışım modifiye edici olarak doğrudan eklenir (“Geri Dönüştürülmüş Plastiklerin Asfalt İçin Kullanımı Üzerine Araştırma Gerekliyor” n.d.), Şekil 2.4'te gösterildiği gibi. Kuru işlem, nihai modifiye asfalt kaplamanın kayma direncini ve dayanıklılığını artırır (Chesner vd. 2002).



Şekil 2.4 İnşaat plastikleri ile modifiye edilmiş asfalt kaplamanın kuru işlem süreci (İnt.Kyn.5).

Islak işlem

Islak işlemde, geri dönüştürülmüş plastikler, diğer polimer katkılarla birlikte asfalt bağlayıcıya eklenir ve agregalarla karıştırılmadan önce belirli bir süre baz bağlayıcı ile karıştırılır (Rath vd. 2019) (Şekil 2.5). Islak işlem, 1960'ların ortalarında Arizona'nın Phoenix kentindeki bir malzeme mühendisinin kauçuğu bitüm ile karıştırmasıyla ilk kez geliştirilmiştir (Presti 2013). Islak işlem, kontrollü kaplamayla karşılaştırıldığında benzer veya daha yüksek performans sunan kaplamalar üretir (Rath vd. 2019) (Kök vd.2013). Atık plastikler, yaklaşık 165°C'lik asfalt karıştırma sıcaklığına kıyasla düşük erime noktasına sahip olduğundan, ıslak işlemde uygun şekilde dahil edilebilir. Bitüme eklenen polimer miktarları genellikle toplam karışımın küçük bir kısmını (ağırlıkça) oluşturur (J. Santos vd. 2021). Polietilen bazlı (PE) plastikler, 110-130°C'lik nispeten düşük erime noktaları nedeniyle bitümle karıştırma sıcaklığından önemli ölçüde daha düşük olduğundan, asfalt içinde iyi dağılır (Singh vd. 2017).



Şekil 2.5 Plastik katkıli asfalt kaplamasının yaş yöntemle üretimi (İnt.Kyn.6).

2.3.1.3 Performans ve İşlevsel Faydalar

Yol mühendisleri, yüksek yapı performansına ve daha fazla işlevsel faydaya sahip yollar inşa etmek istemektedir. Yapı, tekerlek izleri ve çatlaklar gibi farklı parametrelerle karakterize edilebilir; gürültü azaltma, sürüş kalitesi ve dayanım ise işlevsel faydalar

olarak değerlendirilir. Birçok çalışma, performans iyileştirmesini araştırmak için lastik modifiyeli asfaltı incelemiştir (Chen vd. 2019). Örneğin, Mizzou Asfalt Kaplama ve İnovasyon laboratuvarı, karışım tasarımı ve sürdürülebilir kaplama konusunda öncü asfalt araştırmalarına adanmıştır. Çeşitli plastikler (lineer düşük yoğunluklu polietilen bazlı) modifiye bağlayıcılar ve karışımlar bu laboratuvarında test edilmiştir. Ön veriler, plastik modifiyeli asfalt karışımının tekerlek izi direncini büyük ölçüde iyileştirdiğini ve düşük sıcaklıkta çatlama direncini belirli bir oranda artırdığını göstermiştir. PMA karışımları üzerine başka bir araştırma benzer sonuçlar ortaya koymuştur (El-Naga ve Ragab 2019). Plastik modifiyeli asfalt karışımları, modifiye edilmemiş karışımlara kıyasla daha iyi yorulma çatlak direnci (Ghuzlan vd. 2013) ve daha yüksek kırılma tokluğu ile düşük sıcaklıkta çatlama direnci göstermiştir (Isacsson ve Zeng 1998). Ayrıca, PMA karışımları karışımın özgül ağırlığını düşürme avantajına sahiptir.

PMA'nın bir başka faydası yol gürültüsünün kontrolü ile ilgilidir. Yol mühendisleri uzun zamandır minimal gürültüye sahip bir yol malzemesi aramaktadır, bu giderek daha fazla kentleşen bir dünyada hayati bir konudur. Plastik/lastik modifiyeli asfaltın yaklaşık 3-7 dB gürültü azaltımı sağladığı tespit edilmiştir ("Yol Gürültüsünün Karışım Seçimiyle Azaltılması | Asfalt Dergisi" tarihsiz). Arizona'da yürütülen Sessiz Kaplama Pilot Programı, asfalt lastik sürtünme tabakası kullanarak ortalama 9,6 dB gürültü azaltımı sağlamıştır (Donavan ve Janello 2021). Asfalt Lastik Sürtünme Tabakası, test edilen diğer dört tabakadan daha düşük gürültü seviyesine sahiptir. Ancak yol gürültü seviyelerinin hava boşlukları, dane boyutu, bağlayıcı içeriği, kalınlık veya araç hızları, sıcaklık, nem gibi farklı yüzey katmanı parametrelerine bağlı olarak değişebileceğinin farkında olmamız gerekir. Gürültü seviyelerini kontrol eden mekanizmaları anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

2.3.2 Cam Atıklarının Geri Dönüşümü

Cam, yüksek geri dönüşüm oranı (neredeyse %100) ile dikkat çeken ve en yaygın katı atık malzemelerinden biri olarak değerlendirilen uygun malzemelerden biridir (Papadakis vd. 2014, Villain vd. 2009). Kimyasal olarak dış etkenlere karşı dayanıklı olmasının yanı sıra mükemmel ısı yalıtım özelliklerine sahip olması, camın avantajları arasında yer

almaktadır. Ancak, camın doğasında bozulmama özelliği bulunduğundan, atık cam veya kullanılmayan cam yan ürünlerinin depolanması gereklidir. Bununla birlikte, atık camın taşınması ve bertaraf edilmesi sırasında safsızlıkların oluşma olasılığı bulunmaktadır. İnşaat sektöründe atık camın kullanımı, cam saflığına olan talebin azalması nedeniyle uygun bir alternatif sunmaktadır. Ancak, cam kullanım oranı geri dönüşüm oranına göre hala yüksektir ve (Çizelge 2.1) depolama alanları dikkate alındığında, yeni bir geri dönüşüm veya yeniden kullanım yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 2.1 ABD'de üretilen, geri dönüştürülen ve depolanan camın bin ton cinsinden miktarı (2000-2018) (İnt.Kyn.7).

	2000	2005	2010	2015	2017	2018
Üretilen	12.770	12.540	11.520	11.470	12.300	12.250
Geri Dönüştürülen	2.880	2.590	3.130	3190	3.070	3.060
Depolanan	8.100	8.280	7.030	6.840	7.580	7.550

Cam, silika, sodyum karbonat, dolomit ve kireçtaşı karışımının 1600 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda eritilmesiyle üretilmektedir. Karışım, istenmeyen kristalleşme nedeniyle soğuyarak katı amorf bir malzeme haline gelir (Karthiken vd. 2018). Camın geri dönüşümünün önemli avantajlarından biri, işleme sırasında daha düşük sıcaklık gereksinimidir. Belirli özellikler veya renkler, özel katkı maddeleri ile elde edilebilmektedir (Karthiken vd. 2018).

Bu bilgiler, deneysel çalışmalarla desteklenmiş genel bilgilerdir. Camın kimyasal bileşimi ile çimento veya agregaların kimyasal bileşimi farklılık gösterebilir; ancak bu iki malzemenin özellikleri yurtdışındaki diğer çalışmalarla doğrulanmıştır (Karthiken vd. 2018). Camın üretimi ve kullanımı, antik tarihe (milattan önce) kadar uzanmaktadır; ancak camın ilk kez ne zaman ve nasıl üretildiği henüz kesin olarak belirlenmemiştir. Araştırmalar, camın geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, üretimden ikincil hammadde olarak işlenmesi ve genel olarak cam depolama alanlarının önlenmesi yönünde önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Bu durum, yüksek miktardaki atıkların küresel bir sorun olduğu gerçeğiyle birleşmektedir (Karthiken vd. 2018) ve bu sorun, birçok bilim dalı tarafından ele alınmaktadır. İnşaat atıkları, dünya genelinde üretilen atıkların en büyük

kalemlerinden biri olup, bu durumun emisyonlar ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri ile ilişkili olduğu gözlemlenmektedir (Karthiken vd. 2018.). Dolayısıyla, bu olumsuz etkileri belirli bir (yüksek) ölçüde ortadan kaldırmaya yönelik genel bir çaba vardır.

2.4 Tez Konusu ile ilgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Punith vd. (2003), geri dönüştürülmüş parçalanmış atık plastik torbaların bağlayıcı katkı maddesi olarak kullanıldığı bitümlü kaplama karışımının davranışını incelemiştir. Araştırmada, 80/100 penetrasyon dereceli bitüm ile plastik modifikatörün eklenmesiyle yapılan temel testler (penetrasyon, duktilite ve yumuşama noktası) gerçekleştirilmiş ve modifiye bağlayıcının özellikleri değerlendirilmiştir. Laboratuvar testleri, plastik modifikatör oranı arttıkça penetrasyon ve duktilite değerlerinin düştüğünü, ancak yumuşama noktasının arttığını ortaya koymuştur. Marshall stabilite testleri, bitümlü beton karışımının optimum bitüm içeriğini (OBC) ve optimum modifikatör içeriğini (OMC) belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bitümlü beton numuneleri, ASTM 1559 standart test prosedürlerine uygun olarak %4,5, %5,0, %5,5 ve %6,0 bitüm ile hazırlanmıştır. En uygun plastik içeriği, bağlayıcının ağırlığının %8,0'ı olarak bulunmuştur. Tekrarlı yük testleri, farklı sıcaklıklar (25°C, 30°C ve 35°C) ve stres seviyelerinde (ultimate failure load'un %40'ı ve %50'si) plastik modifikatörlü ve modifikasyonsuz bitümlü kaplama karışımının davranışını incelemiştir. Fatigue testleri, Marshall numunelerine sinüzoidal dalga formu uygulanarak yapılmış ve sonuçlar, plastik modifikasyon uygulanmış bitümlü kaplamanın, sade bitümlü kaplamaya göre daha yüksek bir dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir.

Hınıslıoğlu ve Ağar (2004), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) içeren çeşitli plastik atıkların asfalt betonunda polimer katkı maddesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Araştırmada, farklı karıştırma süreleri, karıştırma sıcaklıkları ve HDPE içeriği ile elde edilen HDPE-modifiye bağlayıcının Marshall Stabilitesi, akış ve Marshall Oranı (stabilite ve akış oranı) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıcak Karışım Asfalt (HMA) için hazırlanan bağlayıcılar, HDPE'nin %4-6 ve %8 oranında (optimum bitüm içeriğinin ağırlığına göre) ve AC-20 ile 145-155 °C ve 165 °C sıcaklıklarda, 5-15 ve 30 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. HDPE-modifiye asfalt betonunun, Marshall Stabilitesi

(dayanıklılık) değerinde ve Marshall Oranı (deformasyona karşı direnç) değerinde dikkate değer bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır. %4 HDPE, 165 °C karıştırma sıcaklığı ve 30 dakika karıştırma süresi, Marshall Stabilitesi, akış ve Marshall Oranı (MQ) için optimum koşullar olarak belirlenmiştir. MQ'nın kontrol karışımına göre %50 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Atık HDPE ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların, yüksek stabilite ve yüksek MQ değerleri sayesinde kalıcı deformasyonlara karşı daha iyi direnç sağladığı ve bu durumun plastik atıkların geri dönüşümüne katkıda bulunarak çevrenin korunmasına yardımcı olduğu söylenebilir.

Al-Hadidy vd. (2009), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanılarak asfalt kaplama malzemelerinin modifikasyonunu incelemişlerdir. Araştırma, LDPE'nin asfalt bağlayıcıları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, LDPE'nin asfaltın yumuşama noktasını %26 oranında artırdığı, akıcılığı azalttığı ve dayanıklılığı artırdığını gözlemlemişlerdir. LDPE ile modifiye edilmiş taş mastik asfalt (SMA) karışımlarının, rutlaşma potansiyelini azalttığı ve nem hasarına karşı direnç gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, LDPE içeren karışımların yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık ve yağışlı bölgelerdeki performans gereksinimlerini karşıladığı bulunmuştur. Multi-layer elastic analysis programı kullanılarak yapılan hesaplamalar, LDPE modifikasyonunun asfalt kaplamanın hizmet ömrünü uzattığını ve katman kalınlığını azaltma potansiyelini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, LDPE'nin asfalt kaplama malzemelerinde kullanımı hem performans hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağladığı görülmüştür.

Jony vd. (2011), sıcak asfalt beton karışımlarında cam tozu dolgu malzemesinin etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Araştırma, cam tozunun geleneksel kireç taşı tozu ve portland çimentosu yerine alternatif bir dolgu malzemesi olarak kullanılmasını önermektedir. Çalışmada, üç farklı dolgu malzemesi (kireç taşı tozu, portland çimentosu ve cam tozu) ile birlikte her biri için üç farklı dolgu içeriği (%4, %7 ve %10) kullanılarak toplam dokuz karışım hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar, cam tozu dolgu malzemesinin kullanılmasıyla elde edilen asfalt karışımlarının Marshall stabilite değerlerinde %6 ile %36 arasında bir artış sağladığını göstermektedir. Ayrıca, cam tozu dolgu malzemesi ile üretilen karışımların akış değerleri, portland çimentosu ve kireç taşı tozu ile yapılan

karışımlara göre daha düşük çıkmıştır. Cam tozunun, asfalt karışımlarında dolgu malzemesi olarak kullanılması, karışımların daha hafif olmasına ve daha yüksek boşluk yüzdesine sahip olmasına yol açmıştır; bu durum, %10 dolgu oranında %15'e kadar bir azalma göstermektedir. Araştırmanın bulguları, cam tozunun asfalt karışımlarında dolgu malzemesi olarak potansiyel bir alternatif olduğunu ortaya koymakta ve bu malzemenin kullanımıyla birlikte asfalt karışımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir. Çalışma, cam tozunun asfalt karışımlarındaki performansını artırma potansiyelini vurgulamakta ve gelecekte bu konuda daha fazla araştırma yapılmasını önermektedir. Özellikle, cam tozunun asfalt karışımlarındaki çekme ve eğilme dayanımına etkisi ile karışımların dayanıklılığının incelenmesi gerektiği belirtilmektedir.

Attaelmanan vd. (2011), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kullanılarak asfalt kaplama malzemelerinin modifikasyonunu incelemişlerdir. Farklı HDPE oranları, 80/100 asfalt ile karıştırılarak, modifiye ve modifiye edilmemiş asfalt bağlayıcıları fizikokimyasal ve homojenlik testlerine tabi tutulmuştur. Performans testleri arasında Marshall Stabilitesi, Marshall Oranı (MQ), çekme dayanımı, çekme dayanım oranı, fleksural dayanım ve elastik modül yer almıştır. Test sonuçları, HDPE ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının geleneksel karışımlara göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. HDPE'nin asfalt karışımına eklenmesi, nem ve sıcaklık hassasiyetini azaltmakta ve 5% HDPE içeriği, asfalt beton karışımlarının performansını artırmak için önerilmektedir. Çalışma, HDPE'nin asfalt kaplama malzemelerinde kullanımıyla elde edilen iyileştirmelerin hem dayanıklılık hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir.

Ahmadinia vd. (2011), geri dönüştürülmüş plastik şişelerin (Polietilen Tereftalat – PET) taş mastik asfalt (SMA) karışımındaki mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırma boyunca, değişik oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) PET eklenmiş asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özellikleri laboratuvar testleri ile test edilmiştir. Elde edilen bulgular, %6 oranında PET eklenmesinin karışımın Marshall stabilitesini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Marshall stabilite testleri, PET'in bitüme uygun şekilde entegre edilmesiyle birlikte karışımın genel performansını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, çalışmada uygulanan

iki faktörlü varyans analizi (ANOVA), PET modifikasyonunun karışımın hava boşluğu oranı, bulk özgül ağırlık ve Marshall stabilitesi üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlemiştir. Deneysel bulgular, atık PET'in asfalt karışımında kullanılması hâlinde hem mekanik performansın artırılması hem de çevresel problemlerin azaltılması açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın sonuçları, geri dönüştürülmüş malzemelerin inşaat sektöründe sürdürülebilir bir şekilde yeniden kullanılmasının önemini ve yol inşaatlarındaki maliyetleri düşürme potansiyelini vurgulamaktadır. Aynı zamanda, bu yöntemlerin çevre dostu uygulamalara katkı sağlayabileceği ifade edilmektedir.

Kalantar vd. (2012), asfalt kaplama malzemelerinde atık ve yeni polimerlerin kullanımı incelenmişlerdir. Polimer modifikasyonu, asfaltın çeşitli sıcaklık aralıklarındaki mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için kritik bir yöntemdir. Araştırma hem geri dönüştürülmüş polimerlerin hem de yeni polimerlerin asfalt bağlayıcıları üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Uygulamalı deneyler, polimerlerin asfaltla etkileşimi ve bu etkileşimin asfaltın performansına olan katkılarını ortaya koymuştur. Deneysel süreçte, farklı oranlarda geri dönüştürülmüş ve yeni polimer karışımları kullanılarak, bu malzemelerin fizikokimyasal özellikleri, viskoelastik davranışları ve dayanıklılık testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş polimerlerin, yeni polimerlerle benzer performans iyileştirmeleri sağladığını göstermiştir; örneğin, rutlaşma direnci ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılık önemli ölçüde artmıştır. Çalışmada, polimerlerin asfalt üzerindeki tarihsel kullanımı, bu modifikasyonların avantajları ve asfaltın özelliklerini geliştirmek için nasıl entegre edildiğine dair detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş polimerlerin kullanımı, ekonomik ve çevresel açıdan fayda sağlama potansiyelini beraberinde getirmektedir, bu da atık yönetimi sorunlarını azaltmakta ve asfalt performansını arttırmaktadır. Polimerlerin asfaltla karıştırılmasında iki ana yöntem (ıslak ve kuru yöntem) kullanılmakta ve polimerlerin özellikleri, bitüm ile uyumluluğu, karıştırma koşulları gibi faktörlerin, polimer-modifiye asfaltların (PMA) performansını etkilediği vurgulanmıştır. Genel olarak hem yeni hem de atık polimerlerin asfalt kaplama malzemelerinde kullanımı, hem yol performansını artırmakta hem de çevresel etkileri azaltmaktadır. Çalışmanın bulguları, yol yapımında sürdürülebilir malzeme kullanımı konusunda büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Chee vd. (2014), geri dönüştürülmüş polietilenin (PE) asfalt bağlayıcılarının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, farklı PE konsantrasyonları kullanılarak bitüm ile karıştırılmış ve bu karışımların reolojik, mekanik, termal ve yüzey morfolojisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik kayma reometresi kullanılarak yapılan reolojik testler, geri dönüştürülmüş polietilen eklenmesiyle bitümün karmaşık kayma modülünün, depolama modülünün ve kayıp modülünün arttığını göstermiştir. Termogravimetrik analizler, polietilen ile modifiye edilmiş bitümün termal stabilitesinin, modifiye edilmemiş bitüme göre önemli ölçüde iyileştiğini ortaya koymuştur. Penetrasyon testleri, polietilen içeriği arttıkça bitümün sertliğinin arttığını ve deformasyona karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermiştir. Ayrıca, viskozite testleri, polietilen eklenmesiyle bitümün akışa karşı direncinin arttığını ve bu durumun karışımın işlenebilirliğini etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Düktilite testleri, polietilen eklenmesiyle birlikte bitümün düktilite değerinin azaldığını, ancak 10 wt %'ye kadar olan eklemelerin asfalt uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş polietilenin bitüm ile karıştırılması, hem mekanik hem de termal özellikleri iyileştirerek, modifiye bitümün performansını artırmaktadır. Bu çalışma, geri dönüştürülmüş polietilenin asfalt kaplama malzemelerinde kullanılmasının çevresel ve ekonomik faydalarını vurgulamaktadır.

Kwame vd. (2015), yaptıkları çalışmada Gana'daki atık plastik malzemelerin bitümlü yol inşaatında modifikatör olarak kullanımının uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Yapılan araştırmada, atık plastiklerin yol yapımında kullanılmasının çevresel kirliliği azaltma potansiyeli ortaya koyulmuştur. Çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) gibi atık plastiklerin, AC-10 bitüm ile çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen polimer-bitüm karışımının reolojik özellikleri laboratuvar ortamında incelenmiştir. Sonuçlar, plastik katkı oranı arttıkça bitümün sertliğinin ve viskozitesinin yükseldiğini, ayrıca yumuşama noktasının da arttığını göstermiştir. Özellikle, %2 plastik katkı ile elde edilen modifiye bitümün, geleneksel AC-20 bitüm ile benzer özellikler gösterdiği ve bu durumun asfalt beton karışımlarının kalitesini artırarak bitüm kullanımında tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, atık plastiklerin yol inşaatında kullanılmasıyla çevresel sorunların azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Shafabakhsh vd. (2015), sıcak karışım asfaltın (HMA) mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde mikro silika tozunun potansiyelini araştırmışlardır. Bu amaca ulaşmak için, farklı bitüm ve mikro silika içeriğine sahip karışımlar hazırlanmış ve tekerlek izi ve sürünmeye karşı direnci değerlendirmek için asfalt kaplama karışımları üzerinde tekrarlanan yük eksenel (RLA) testi yapılmıştır. Ayrıca, bitüm üzerinde ampirik reolojik test (penetrasyon, yumuşama noktası, süneklik ve viskozite) ve dinamik kayma reometresi (DSR) ile temel reolojik test, modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş bitüm üzerinde gerçekleştirilir. Son olarak, deneysel sonuçlar ve sayısal analiz kullanılarak, mikro silika ile geleneksel ve modifiye asfalt karışımlarının sıcaklık ve strese bağlı olarak farklı koşullar için sürünme davranışının tahmini için iki deneysel model gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, bitüme mikro silika eklenmesinin HMA'nın kalıcı deformasyonunun iyileştirilmesinde büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca bitüm üzerinde yapılan testlerin sonuçları, mikro silika ilavesinin penetrasyonu, sünekliği, sıcaklık duyarlılığını azalttığını ve yumuşama noktasını, sertliği ve viskoziteyi arttırdığını göstermiştir. Mikro silika modifiye bitümün sıcaklık hassasiyeti, mikro silika içeriği artırılarak azaltılmıştır. Sıcaklık duyarlılığı daha düşük olan bağlayıcılar, tekerlek izi oluşumuna ve düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı daha fazla dirence sahiptir. Ayrıca dinamik kesme kompleksi modülü (G^*) değeri, yükleme frekansları boyunca önemli ölçüde dinamik kesme kompleksi modülü (G^*) değeri, yükleme frekansları boyunca önemli ölçüde artar.

Galooyak vd. (2015), nano-silika modifiye bitümü araştırmışlardır. Ilık karışım asfaltın (WMA) fiziksel, mekanik ve reolojik özelliklerini değiştirmek için bitüme farklı Nano-silika içerikleri, ağırlıkça %2, ağırlıkça %4 ve %6 eklendi. WMA, ağırlıkça %2 Sasobit (uzun zincirli hidrokarbonların karışımı) içerir. Modifiye bitüm ve WMA'yı karakterize etmek için çeşitli kalite kontrol testleri yapılmıştır. Reolojik araştırmalar, baz bitümün kompleks modülünün, Nano-silika yüzdesini ağırlıkça %2'den %6'ya çıkararak arttığını göstermiştir. Nano-silika modifiye bitüm için faz açısı ve tekerlek izi faktörü de önemli ölçüde azalmıştır. Reolojik analizden, optimum içerik olarak ağırlıkça %6 Nano-silika seçilmiştir. Asfalt karışımları üzerinde yapılan incelemelerin sonuçları, Nano-silika içeriğinin artmasıyla ılık karışım asfaltın kalitesinin arttığını göstermiştir. Nano-silika içeriğini artırarak, WMA'nın esneklik modülü arttı; bu nedenle, trafik yükü altındaki

üstyapı tepkisi azalmıştır. Sasobit WMA'ya Nano-silika ekleyerek çatlama derinliği önemli ölçüde azaldı. Böylece, WMA'nın yorulma ömrü Nano-silika varlığında uzatılmıştır. Ayrıca tekerlek izleme testi sonuçları modifiye numunelerin tekerlek izi derinliğinin azaldığını göstermiştir. Nano-silika modifiye bağlayıcılarla asfalt betonları, belirli bir yükleme koşulunda daha az sıcaklık hassasiyeti ve daha az tekerlek izi ve kalıcı deformasyon göstermiştir. WMA'daki sonuçlar, Nano-silikanın ağırlıkça %6'sının optimum içerik olduğunu gösterdi.

Saltan vd. (2015), sıcak karışım asfalt (HMA) içinde cam atıklarının mineral dolgu malzemesi olarak kullanımını incelemişlerdir. Artan dünya nüfusu ve sanayileşme ile doğal kaynakların tükenmesi, atık malzemelerin ve yan ürünlerin inşaat sektöründe kullanılmasının önemini artırmaktadır. Araştırmada, cam kırığı ve atık cam şişe tozu, geleneksel kırılmış taş tozu yerine alternatif olarak değerlendirilmiştir. Altı farklı bitüm içeriği kullanılarak optimum bitüm miktarı belirlenmiş ve bu içerik ile üç farklı mineral dolgu malzemesi (cam kırığı, cam şişe atığı ve taş tozu) ile çeşitli dolgu oranları ile asfalt karışım örnekleri hazırlanmıştır. Marshall stabilite testi ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, cam atıklarının, ekonomik ve çevresel faktörler uygun olduğunda, asfalt karışımlarında mineral dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, atık camların asfalt yapımında hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayabileceğini göstermektedir.

Appiah vd. (2017), Gana'da yol inşaatında kullanılmak üzere atık plastik malzemelerin, özellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve polipropilen (PP) gibi termoplastik polimerlerin, konvansiyonel AC-20 sınıfı bitüm ile karıştırılmasının etkilerini incelemişlerdir. Araştırma, atık plastiklerin yönetimi ve yol yüzeyindeki çukurların oluşumunu azaltma amacı taşımaktadır. Bitüm, 160-170°C sıcaklık aralığında bir karıştırıcıda plastiklerle karıştırılarak modifiye edilmiştir. Yapılan temel reolojik testler, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite gibi parametrelerin değişimini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, HDPE ve PP ile modifiye edilmiş bitümün, modifiye edilmemiş bitüme göre daha iyi fiziksel özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, PP'nin homojenlik ve uyumluluk açısından daha iyi sonuçlar verdiği, viskozitenin arttığı ve penetrasyon değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. FTIR

spektroskopisi, bitüm kompozitlerinde kimyasal değişikliklerin varlığını incelemek için kullanılmış ve polimerlerin bitüm matrisine başarılı bir şekilde entegre olduğu belirlenmiştir. Çalışma, atık plastiklerin bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla elde edilen iyileştirmelerin, hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, atık plastik modifiye bitüm, Gana'da plastik atık yönetimi için alternatif bir yöntem sunmakta ve yol inşaatında kullanılacak potansiyele sahip olduğu vurgulanmaktadır.

Farahani vd. (2018), atık düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve kırılmış lastik kullanılarak bitümün performans özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamışlardır. İlk olarak, yüksek hızlı karıştırıcı kullanılarak modifiye bitüm örnekleri hazırlanmış ve ardından klasik ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. LDPE ve kırılmış lastik eklenmesinin bitümün klasik özelliklerini artırdığı gözlemlenmiştir. Dinamik kayma reometresi (DSR) testleri sonucunda, %3 LDPE ve %3 kırılmış lastik içeren örneğin en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Kısa ve uzun süreli yaşlandırma deneyleri, bu karışımın yüksek sıcaklık hizmetlerinde performansının iyileştiğini göstermiştir. Bending Beam Rheometer (BBR) testi sonrası, %3 LDPE ve %3 kırılmış lastik içeren örneğin daha uygun bir performans derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık LDPE ve kırılmış lastik kullanımı, bitümün hem yüksek hem de düşük sıcaklık performansını artırarak, çevresel ve ekonomik faydalar sağlamakta önemli bir potansiyele sahiptir.

Suryana vd. (2018) plastik torba atıklarının değiştirici olarak sıcak karışım asfalt olarak kullanıldığı araştırmışlardır. Endonezya, dünyada plastik deniz enkazına katkıda bulunan en büyük ikinci ülkedir. Öte yandan Endonezya, çeşitli nedenlerden dolayı karayolu sorunuyla karşı karşıya olduğundan, karayolunu kalitesini ve performansını iyileştirmesi gerekiyor. Sıcak karışım asfaltına (HMA) plastik atıkların eklenmesi aslında yolun kalitesini iyileştirmede faydalı etkiye sahiptir. Araştırmacı, HMA'ya plastik atık eklenmesinin Marshall stabilitesini ve karışımın esnek modülünü artıracığını, sıyırma direncini, nem hassasiyetini artıracığını bildirdi. Belirli bir plastik içeriğe kadar, plastik atıkların eklenmesi, HMA'nın yorulma ömrünü ve yırtılma direncini artıracak, aksine

plastik atıkların aşırı eklenmesi, geleneksel HMA'ya kıyasla yorulma ömrünü ve yorulma direncini azaltacaktır.

Karacasu vd. (2018) atık lastik kauçuk ve cam elyaf modifiye bitümün asfalt betonu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Modifiye bitüm içeren atık kauçuk ve cam elyafın asfalt betonun performans özelliklerine etkileri belirli oranlarda incelenmiştir. Bu malzemelerle modifiye bitüm kullanılarak Marshall tasarımı numuneler elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde; Modifiye edilen numunelerin Marshall stabilitesinin daha az olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, tüm numuneler gerekli standart koşulları karşılar.

Karthiken vd. (2018), bitüm bağlayıcısının ve karışımının özelliklerini geliştirmek amacıyla nano silika ve mikro silikanın etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, bitüm ile %2, %4, %6 ve %8 oranlarında nano silika ve mikro silika karıştırılmış ve modifiye bitüm, düktilite, viskozite, yumuşama noktası ve penetrasyon gibi özellikler açısından test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, nano silikanın modifikasyon üzerindeki etkisinin mikro silikadan daha belirgin olduğunu göstermektedir. Marshall stabilitesi, dolgunun dayanıklılığı, dolaylı çekme dayanımı ve dolaylı sertlik modülü gibi mühendislik özellikleri de değerlendirilmiştir. Nano silika ile yapılan modifikasyon, bitümün penetrasyonunu %17 ve yumuşama noktasını %18 oranında iyileştirirken, mikro silika ile bu değerler sırasıyla %14 oranında artmıştır. Ayrıca, nano silika ile modifiye edilmiş karışımın stabilitesi 20.18 kN olarak belirlenirken, mikro silika ile modifiye edilmiş karışımın stabilitesi 18.30 kN olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, her iki modifikasyonun da asfalt karışımlarının performansını artırdığı ve yüksek yükler ile olumsuz iklim koşullarına dayanma kapasitesini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Nouali vd. (2020), Cezayir'deki yol kaplamalarında plastik poşet atıklarının bitüm modifikasyonu için kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Cezayir'deki birçok yol, asfalt kaplama malzemelerinin yetersiz performansı nedeniyle erken aşınma sorunları yaşamaktadır. Araştırma, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) içeren plastik poşet atıklarının, konvansiyonel 40/50 penetrasyonlu bitüm ile karıştırılmasının asfalt karışımlarının davranışını nasıl iyileştirdiğini analiz etmektedir. Yapılan testler, plastik

eklenmesiyle bitümün penetrasyonunun azaldığını ve yumuşama noktasının yükseldiğini göstermiştir. Bu değişiklikler, modifiye bitümün termal duyarlılığını ve yaşlanma oranını azaltmaktadır. Ayrıca, plastik atıkların eklenmesi, asfalt beton karışımının boşluk içeriğini azaltmakta ve sertlik modülünü artırmaktadır. Sonuçlar, plastik poşet atıklarının bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla elde edilen iyileştirmelerin, Cezayir'deki yol kaplamalarının performansını artırabileceğini ve çevresel sorunları azaltabileceğini göstermektedir. Ancak, modifiye bitümün yüksek sıcaklıklardaki depolama stabilitesinin zayıf olduğu ve bu durumun daha fazla araştırma gerektirdiği belirtilmiştir. Genel olarak, plastik poşet atıklarının kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli bir çözüm sunmaktadır.

Ming vd. (2022), atık cam şişelerin asfalt karışımında bitüm modifiye edici olarak kullanılmasının özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde, atık cam şişelerden elde edilen cam tozu, %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında 60/70 penetrasyon dereceli bitüm ile karıştırılmıştır. Yapılan analizler arasında Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopi (FTIR), X-Işını Kırınımı (XRD), X-Işını Floresansı (XRF) ve Elektron Mikroskobu (SEM) yer almaktadır. Sonuçlar, cam tozunun bitümün yumuşama noktasını düşürdüğünü ve 2% ile 4% cam tozu eklenmesiyle bitümün ısıl kaybının arttığını göstermektedir. Ayrıca, cam tozu eklenmesiyle asfalt karışımının Marshall stabilitesinin önemli ölçüde iyileştiği belirlenmiştir. Cam tozunun, asfalt karışımının mühendislik özelliklerini geliştirdiği ve çevre dostu yolların inşasında alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

Çalışma kapsamında, İzmir Tüpraş'ta bulunan tesisten temin edilmiş 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Bitüm numunesine özgül ağırlık, yumuşama noktası, penetrasyon deneyi ve viskozite deneyleri yapılmıştır. Atık malzeme olarak siyah plastik poşet ve cam şişeler kullanılmıştır. Her iki atık bitüm içerisinde homojen olarak dağılması ve karışımın homojen olması için uygun boyutlara getirilmiştir. Cam şişeye ait görseller Şekil 3.1.a'da ve plastik poşete ait görseller Şekil 3.1.b'de sunulmuştur. Siyah plastik poşet 5*5 mm boyutlarda kesilmiş (Şekil 3.2), cam şişe ise Los Angeles Aşınma deney düzeneği yardımıyla 200 mm'lik elekten geçebilecek boyutta cam tozu haline getirilmiştir (Şekil 3.3). Plastik poşet atık ve cam atık ile modifiye edilmiş bitüme özgül ağırlık, yumuşama noktası, penetrasyon deneyi ve viskozite deneyleri yapılarak hibrit karışım için optimum oranlar belirlenmiştir. Belirlenen optimum oranlarda üretilen hibrit karışımlara, plastik atık ile modifiye edilmiş bitüme ve cam atık ile modifiye edilmiş bitüme çeşitli deneyler yapılarak reolojik özellikleri belirlenmiştir.

Mevcut çalışma kapsamında tüm test sonuçları bir örnek kodu ile sunulmuş, böylece her örnek türü için aşağıdaki prensibe göre bir dizi isimlendirme oluşturulmuştur:

- Saf Bitüm: SB
- Modifiye Bitüm: MB
- Atık Cam Tozu: CA
- Plastik Poşet Atığı: PPA
- Atık Cam Tozu ve Plastik Poşet Atığının Karışımından Oluşan Hibrit Karışım: HK
- Atık Cam Tozu ile Modifiye Bitüm + R1(%): MB-CA-(R1)
- Plastik Poşet Atığı ile Modifiye Bitüm + R2(%): MB-PPA-(R2)
- Hibrit Karışım ile Modifiye Bitüm + R1+R2(%): MB-HK-(R1+R2)

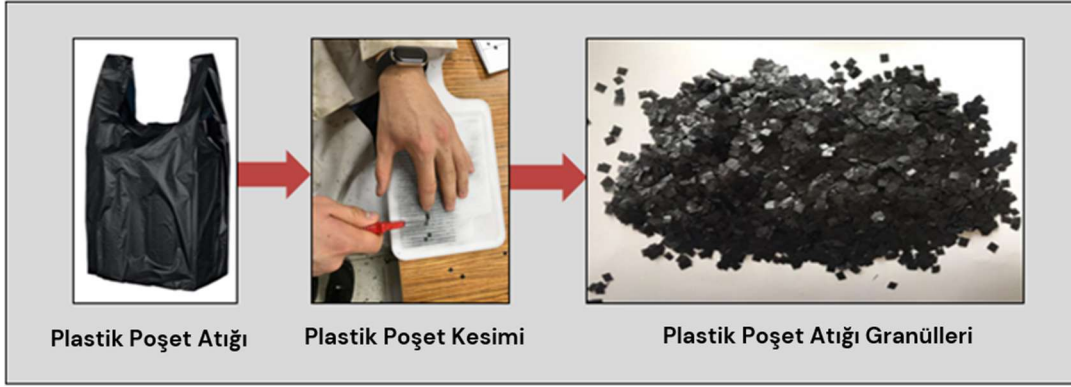
Burada,

R1: Atık cam şişe tozunun karışım içindeki yüzde oranını ifade etmektedir.

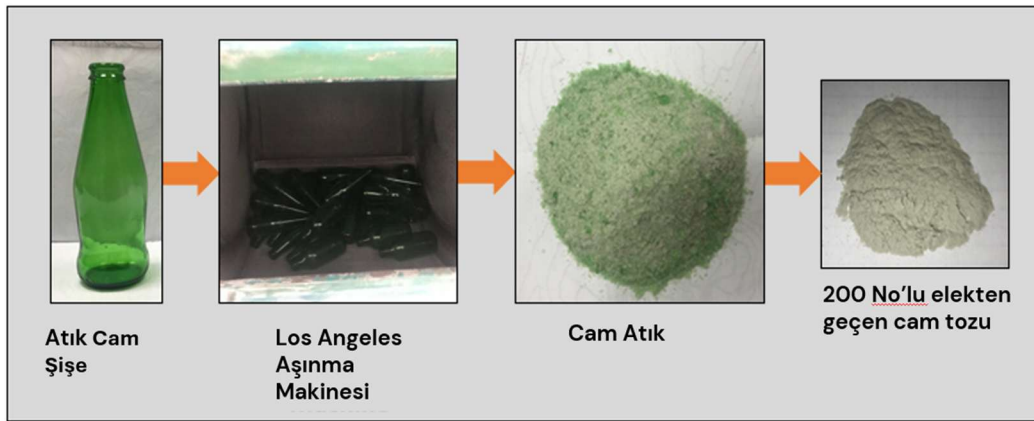
R2: Plastik poşet atığının karışım içindeki yüzde oranını ifade etmektedir.



Şekil 3.1 Kullanılan atık malzemeler.



Şekil 3.2 Siyah plastik poşetin 5*5 mm² boyutlarda kesilme aşamaları.



Şekil 3.3 Cam şişelerin öğütülme aşamaları.

50/70 penetrasyon dereceli bitümün deney sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 50/70 penetrasyon dereceli bitümün malzeme özellikleri.

Özellikler	50/70	Standard
Özgül Ağırlık	1.035	(ASTM D70-03 2003)
Penetrasyon Derecesi (25 °C)	52.13	(ASTM D5-06e1 2006)
Yumuşama Noktası (°C)	46.65	(ASTM D36-06 2006)
135 °C’de Brookfield Viskozitesi (cP)	495.00	(ASTM D4402-06 2006)
165 °C’de Brookfield Viskozitesi (cP)	131.00	

3.2 Metot

Yürütülen çalışmada bitüm modifiyesi toplam 3 ayrı şekilde yapılmıştır. Bitüm modifikasyonunda cam tozunun (CA), plastik poşet atığının (PPA) ve her ikisinin bir arada kullanıldığı 3 farklı numune grubu, mekanik karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır.

400 gramlık bitümün cam tozu ile modifiyesiyle oluşturulmuş numune grubu için ısıtma ve karıştırma sıcaklıkları 160°C olarak belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığına ve hızına ulaşması amacıyla 5 dakika boyunca katkısız bitüme ön karışım işlemi yapılmıştır. Cam tozu, 15 dakika ara ile 4 aşamalı olacak şekilde ilave edilmiştir. Bitüme %0,5, %1,0, %1,5, %3,0 ve %5,0 olmak üzere 5 farklı oranda cam tozu eklenerek bitümün özgül ağırlığı ölçülmüş, Yumuşama Noktası, Penetrasyon deneyleri yapılmış ve Penetrasyon İndeksi değeri hesaplanmıştır.

400 gramlık bitümün plastik poşet atığı ile modifiyesiyle oluşturulmuş numune grubu için ısıtma ve karıştırma sıcaklıkları 180°C olarak belirlenmiştir. Karışım 2000 devir/dk’lık bir hız ile 90 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sıcaklığına ve hızına ulaşması amacıyla 5 dakika boyunca katkısız bitüme ön karışım işlemi yapılmıştır. Plastik poşet atığı, 30 dakika ara ile 3 aşamalı olacak şekilde ilave edilmiştir. Bitüme %0,5, %1,0, %1,5, %3,0 ve %5,0 olmak üzere 5 farklı oranda plastik poşet atığı eklenerek bitümün özgül ağırlığı ölçülmüş, Yumuşama Noktası, Penetrasyon deneyleri yapılmış ve Penetrasyon İndeksi değeri hesaplanmıştır.

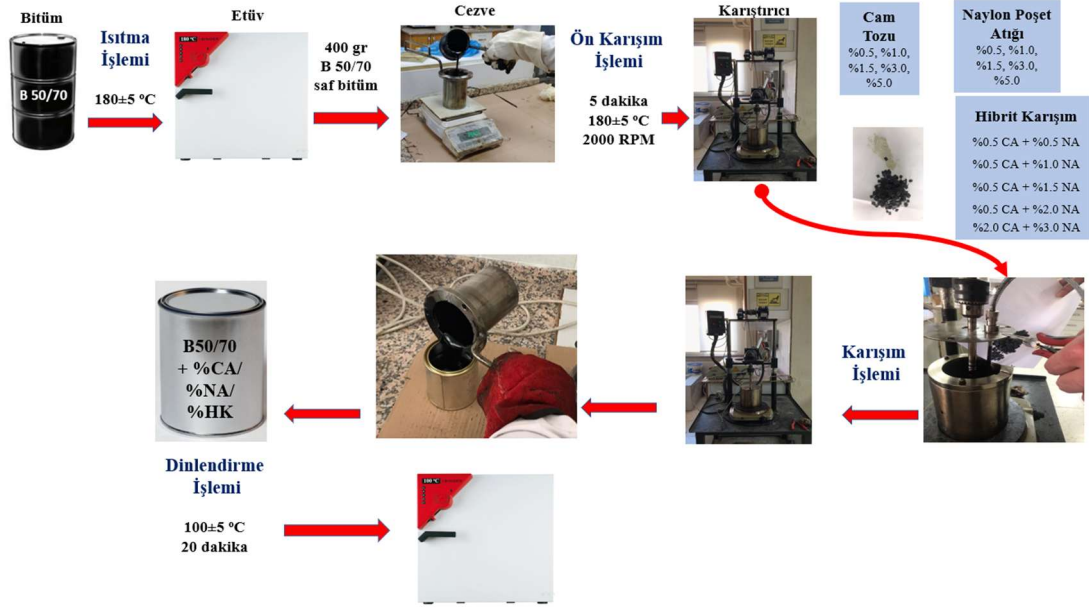
400 gramlık bitümün cam tozu ve plastik poşet atığı ile modifiyesiyle oluşturulmuş numune grubu için ısıtma ve karıştırma sıcaklıkları 180°C olarak belirlenmiştir. Karışım 2000 devir/dk'lık bir hız ile 90 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sıcaklığına ve hızına ulaşması amacıyla 5 dakika boyunca katkısız bitüme ön karışım işlemi yapılmıştır. Cam tozu ve plastik poşet atığı ile oluşturulan katkı malzemesi karışımı, 30 dakika ara ile 3 aşamalı olacak şekilde ilave edilmiştir. Bitüme %0,5 CA+%0,5 PPA, %0,5 CA+%1,0 PPA, %0,5 CA+%1,5 PPA, %0,5 CA+%2,0 PPA, %1 CA+%2,0 PPA olmak üzere 5 farklı oran kombinasyonunda cam tozu ve plastik poşet atığı eklenerek bitümün özgül ağırlığı ölçülmüş, Yumuşama Noktası, Penetrasyon deneyleri yapılmış ve Penetrasyon İndeksi değeri hesaplanmıştır.

Atık malzemelerin karışım sürecine ilişkin bilgilerin özeti Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Atık Malzemelerin Karışım Sürecine İlişkin Bilgiler.

Atık Malzeme	Cam Tozu	Plastik Poşet	Hibrit Malzeme
Bitüm Ağırlığı	400 gr	400 gr	400 gr
Katkı Malzemesi Oranları	%0,5 %1,0 %1,5 %3,0 %5,0	%0,5 %1,0 %1,5 %3,0 %5,0	%0,5 CA + %0,5 PPA %0,5 CA + %1,0 PPA %0,5 CA + %1,5 PPA %0,5 CA + %2,0 PPA %2,0 CA + %3,0 PPA
Isıtma Sıcaklığı	160°C	180°C	180°C
Karıştırma Sıcaklığı	160°C	180°C	180°C
Karıştırma Hızı	2000 devir/dk	2000 devir/dk	2000 devir/dk
Karıştırma Süresi	60 dk	90 dk	90 dk
Katkı Malzemesi İlavesi Aşama Sayısı	15 dakika ara ile 4 aşamalı	30 dakika ara ile 3 aşamalı	30 dakika ara ile 3 aşamalı

Modifiye bitüm üretim sürecine ait özet ise Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Modifiye Bitüm Üretim Süreci.

3.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık deneyi, bitümün fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen önemli bir deneydir. Deney, belirli sıcaklık koşullarında uygulanmaktadır. İlk olarak, piknometrenin net ağırlığı belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Ardından, bir huni yardımıyla piknometreye belirli bir miktarda (15 gr) bitüm eklenmiş ve bu işlem sonrası piknometre yeniden tartılarak kayıt altına alınmıştır. Bitüm, katılaşma sürecinin tamamlanması için bekletildikten sonra, üzerine su ilave edilmiştir. Bu aşamada, hava kabarcıklarının alınmasına özen gösterilmiştir. Tartım işlemi tamamlandıktan sonra, denemenin doğruluğunu artırmak amacıyla oda sıcaklığına ulaşabilmesi için 25°C’lik bir su banyosunda 1 saat süreyle bekletilmiştir. Oda sıcaklığına ulaşmasının ardından, hava kabarcıkları tekrar alınarak tartım işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Penetrasyon Deneyi

Dünya çapında yaygın olarak kullanılan geleneksel bir deney yöntemi olan Penetrasyon Deneyi, belirli bir yük ve sıcaklık altında bitüm kıvamını belirlemek için

uygulanmaktadır. Düzenekte, 5 saniye boyunca özel bir şekle sahip iğne yardımıyla genelde 100-200 gramlık bir sabit yük ve 25°C'lik sıcaklık koşulları kullanılır.

3.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama Noktası Deneyi, bitümün ısıtma sıcaklığını belirlemek ve kimyasal yapısına müdahale etmeden bitümün akmasını sağlamak için belirlenir. Düzenek, belirli büyüklükteki iki halkadan, ağırlıklı çelik bilyeden, yüksek sıcaklık koşulları sağlamak için manyetik ısıtıcıdan ve kademeli bir sıcaklıktan oluşmaktadır. Bu çalışmada, EN 1427 standardına göre bitüm numuneleri bu deneye tabi tutulmuştur.

3.2.4 Dönel Viskozite Deneyi

Rotasyonel Viskozimetre Testi, bitümün uygulama sırasında ısıtıldığı sıcaklık aralığındaki akışkanlık özelliklerini belirlemek için kullanılır. Deney düzeneği, rotasyonel bir viskozimetre, spindle adı verilen ölçüm geometrisi, sıcaklık kontrollü bir ısıtıcı, özel numune kalıbı ve sıcaklık kontrol cihazından oluşur. Bu test, orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulandığında, 135°C'deki viskozite değerinin 3000 cP'yi aşmaması gerekir (Yüknü vd. 2021).

3.2.5 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Parametreleri

Penetrasyon İndeksi (PI)

Penetrasyon indeksi (PI), penetrasyon ve yumuşama noktası testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanmaktadır. PI değeri genellikle -1 ve +1 aralığındadır ve daha yüksek bir PI daha düşük sıcaklık hassasiyeti gösterir. PI hesaplama ile ilgili klasik bir yaklaşım, aşağıdaki denklem 1'de gösterildiği gibi verilmiştir (Hunter vd. 2015).

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 * \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (3.1)$$

Burada;

Pen₂₅ = 25 °C'deki penetrasyon,

SP = Polimer Modifiye Bitümün (PMB) yumuşama noktası sıcaklığı

Penetrasyon-Viskozite Numarası (PVN)

McLeod (1989), tarafından 25 °C'deki penetrasyona ve 135 °C'deki viskoziteye bağlı olan PI'e alternatif olarak bir penetrasyon-viskozite numarası (PVN) geliştirilmiştir. PVN değeri genellikle – 2 ve 0.5 aralığındadır. Yüksek PVN düşük sıcaklık hassasiyeti gösterirken düşük PVN yüksek sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. PVN değeri Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Morrison vd. 1994, Zaumanis vd. 2013, Mallick ve El-Korchi 2017).

$$\text{Penetrasyon – Viskozite Numarası (PVN)} = \frac{\text{Log } L - \text{Log } X}{\text{Log } L - \text{Log } M} \cdot (-1,5) \quad (3.2)$$

$$\text{Log } L = 4,2580 - 0,79674 \cdot \text{log } P \quad (3.3)$$

$$\text{Log } M = 3,46289 - 0,61094 \cdot \text{log } P \quad (3.4)$$

Burada;

X = 135°C'deki viskozite,

L = PVN=0,0 için 135°C'deki viskozite,

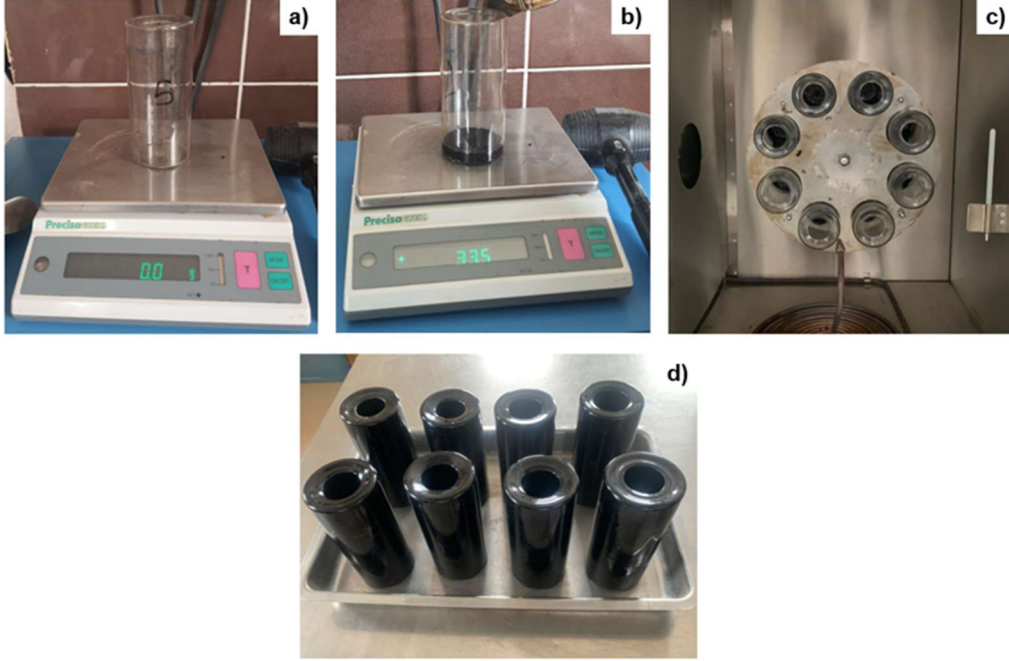
M = PVN=1,5 için 135°C'deki viskozite,

P = 25°C'deki penetrasyon, 1/10 mm.

3.2.6 Dönel İnce Film Fırını (RTFO) ile Kısa Dönem Yaşlandırma Deneyi

Karayolu inşaatı sırasında bitüm bağlayıcısının yaşlanmasını simüle etmek amacıyla, Dönel İnce Film Fırını (RTFO) ile kısa dönem yaşlandırma deneyinde

gerçekleştirilmektedir. ASTM D 2872 standardına göre yapılan bu testte, bitüm bağlayıcı malzemesi hava ve sıcaklık etkisi altında buharlaşarak madde kaybına uğrayarak yaşlanma sürecine girmektedir. Bu deneyde, her birine $35 \pm 0,5$ gram bağlayıcı numunesi 0,001 gram hassasiyetle tartılarak doldurulmuş 8 şişe kullanılır. Bu şişeler, dakikada 15 devirle dönen yatay eksenli bir tablaya yerleştirilir. Etüv sıcaklığının 163°C olarak ayarlandığı bu testte, numuneler standartlara uygun olarak 85 dakika boyunca yaşlandırılır. Deney süresince şişelere, etüvün altındaki bir hava üfleyici aracılığıyla dakikada 4000 ± 200 ml hava püskürtülerek hava etkileri de simüle edilir. Bu koşullar altında sıcaklık, dönme hareketi ve hava akışı, şişe içinde ince bir film tabakası oluşturarak bitümlü bağlayıcının yaşlanma sürecini hızlandırır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Bitüm RTFOT deney aşamaları, a) Boş şişenin darasının alınması, b) Bitüm ağırlığı, c) Numunelerin RTFOT cihazına yerleştirilmesi, d) Deney sonrası durum.

Etüvün 163°C 'ye ulaşması için, deneyden 16 saat önce cihaz çalıştırılır ve termostat, numuneler etüve yerleştirildikten sonra 10 dakika içinde 163°C 'ye ulaşacak şekilde ayarlanır. Numuneleri hazırlamak için bitüm, 150°C altında akışkan hale gelene kadar ısıtılır ve ardından belirtilen şekilde şişelere aktarılır. Şişeler oda sıcaklığına gelene kadar bekletildikten sonra tartılarak kütle kaybı oranı hesaplanır. Kütle kaybı oranı, denklem

(3.5)'deki eşitlikle elde edilmektedir. Superpave performans esaslı şartnamede bu değer en fazla %1 olabilmektedir.

$$K\ddot{u}tle\ kayb\i = \frac{\text{İlk k\ddot{u}tle} - \text{Son k\ddot{u}tle}}{\text{İlk k\ddot{u}tle}} \times 100 \quad (3.5)$$

3.2.7 Nicholson Soyulma Deneyi

Nicholson Soyulma Testi'nde (ASTM D 1664); 9.5-4.75 mm veya 4.75-3.35 mm eleklerinde kalan yaklaşık 200 gram kırılmış agrega numunesi alınır. Numune saf su ile iyice yıkandıktan sonra birkaç kez çalkalanır ve ardından 110°C'deki bir etüvde kurutulur. Yıkanmış kuru agregadan 30±0.5 gram alınır ve 110°C'deki etüvde 1 saat bekletilir. Diğer taraftan, 1.5±0.1 gram bitümlü malzeme (bu oran, deneyde kullanılan agreganın %5'ine karşılık gelir) 250 cm³'lük bir beherde 110°C'deki etüvde ısıtılır. Bitümlü malzeme hazırlandıktan sonra, hemen behera dökülür ve tüm kırmataşlar homojen bir bitüm filmiyle kaplanana kadar bir cam baget kullanılarak 60°C'deki etüvde 24 saat boyunca bekletilir. Bu sürenin sonunda beher etüvden çıkarılır ve 10 cm çapında bir petri kabına aktarılır. Ardından, kaplanmış çakıllar bagetle hafif vuruşlarla düzeltilir ve laboratuvar ortamında 10 dakika bekletilir. Daha sonra petri kabı su ile doldurulur ve üzerine cam kapak kapatılarak 60°C'deki etüvde 24 saat beklemeye bırakılır. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarı alınır, suyu değiştirilir ve karışımın üst yüzeyi yan ışık altında görsel olarak incelenir. Deneyin sonunda soyulmayan yüzeyin toplam yüzeye oranı, soyulmaya karşı direnç olarak belirlenir.

3.2.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik kesme reometresi testi, bitümlü bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıklardaki visko-elastik davranışlarını değerlendirmek için kullanılır. Dinamik kesme reometresi (DSR) testi, ASTM D 7175 standartlarına (ASTM D 7175 2015) uygun olarak yapılmaktadır. Bu çalışmada testler, 1.59 Hz (10 rad/s) frekansında ve 64, 70, 76 ve 82°C sıcaklıklarında, birçok karayolu bölümünde standart seyir hızı olan 90 km/s hıza karşılık gelen trafik yükleri altındaki kesme hareketini simüle etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

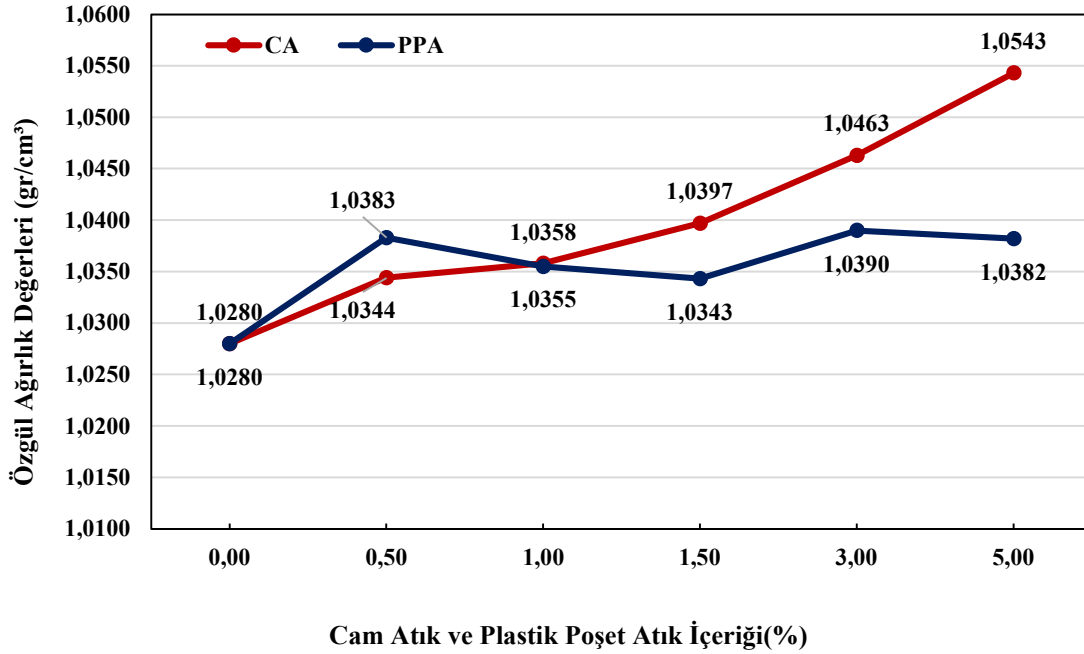
Testler, dört farklı sıcaklıkta gerilme kontrollü bir reometre ile uygulanmıştır. DSR testinde, 1.0 mm açıklığa ve 25 mm çapa sahip paralel aparat kullanılmıştır. DSR testi, penetrasyon bitümünün viskoz ve elastik davranışını, karmaşık kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirleyerek karakterize eder. G^* , asfalt çimentosunun tekrarlayan kesme gerilmeleriyle oluşan deformasyonlara karşı toplam direncinin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri, penetrasyon bitümünün sıcaklığı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişiklik gösterir. Genel olarak, yüksek G^* modülü ve düşük δ açısı, yüksek tekerlek izi direnci ile ilişkilidir. Tekerlek izi oluşumunu önlemek için $G^*/\sin\delta$ parametresinin en az 1 kPa olması gerekmektedir (Yılmaz ve Kök 2008).



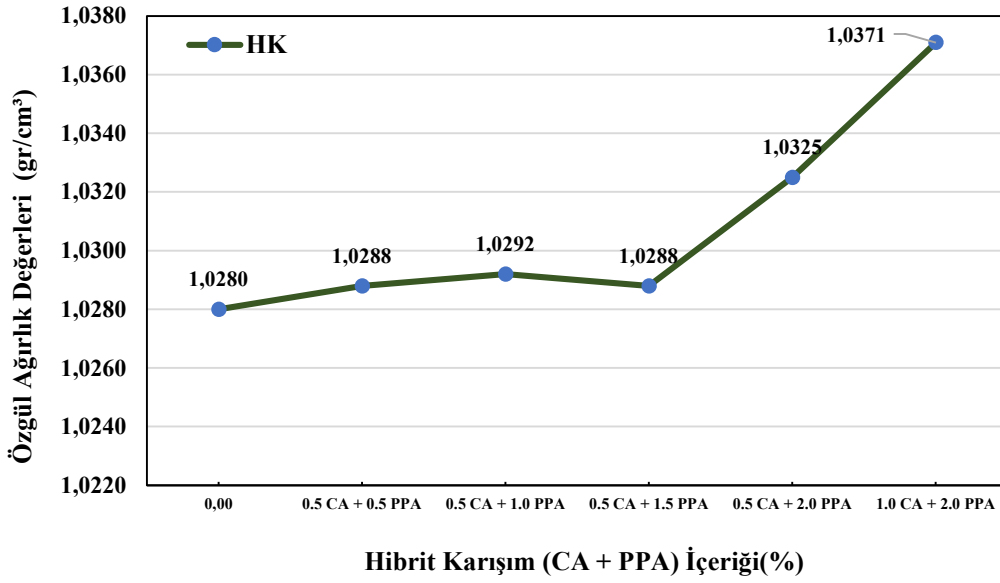
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Çizelge 3.2’de detayları verilen modifiye bitüm numuneleri üretilmiş olup, ASTM D70-03 (2003) yöntemine göre özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Üç farklı numune tipi için özgül ağırlık test sonuçları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmaktadır. Genel olarak, her iki grafikte de modifiye bitümün özgül ağırlık sonuçları saf bitüme kıyasla artma eğilimindedir. Şekil 4.1’de sunulan grafikte plastik poşet ile modifiye edilmiş bitümün %0,5 katkı ile en yüksek seviyeye ulaştığı ve cam tozu katkı oranı arttıkça özgül ağırlığın artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu test sonucunda hibrit karışımların oluşturulması sırasında cam tozu oranı %0,5’te sabit tutulurken, plastik poşet atığı oranı düzenli olarak artırılmıştır.



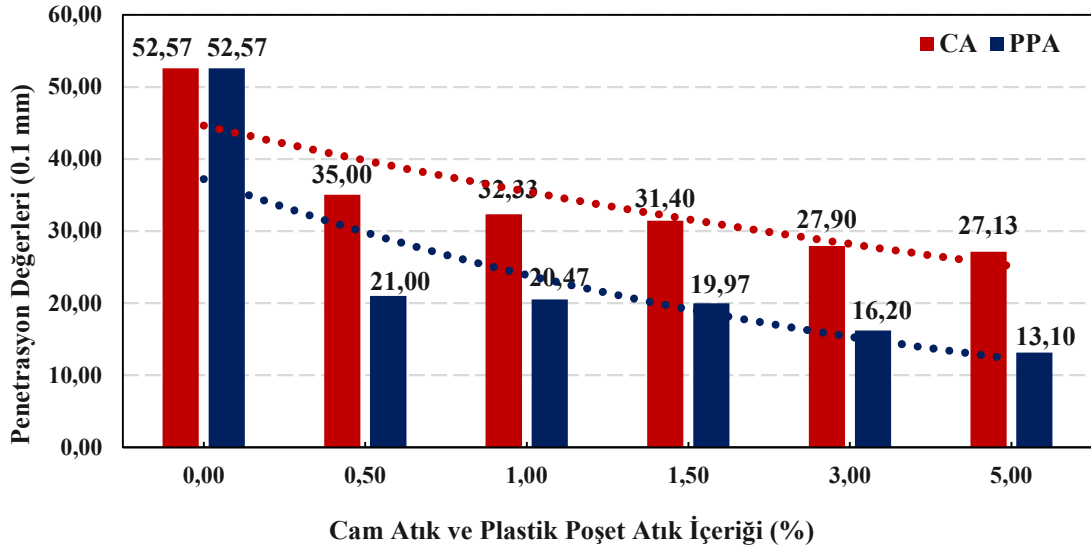
Şekil 4.1 Cam Tozu Atığı (CA) ve Plastik Poşet Atığı (PPA) ile Modifiye Edilen Bitümlerin Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.



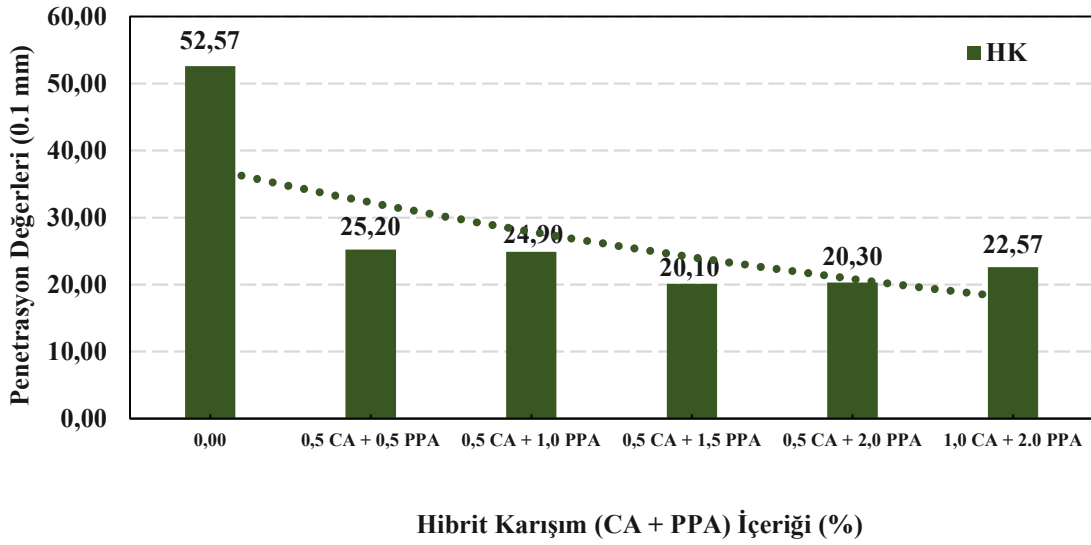
Şekil 4.2 Cam Tozu Atığı (CA) ve Plastik Poşet Atığı (PPA) ile Hibrit olarak Modifiye Edilen Bitümlerin Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.

4.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) CA, (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) PPA ve (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) ile modifiye edilen B50/70 bitümlere uygulanan penetrasyon deneyi sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Genel olarak, her iki grafikte de, tüm seri numunelerdeki modifiye bitümün penetrasyon testi sonuçları saf bitüme kıyasla azalma eğilimindedir. Şekil 4.3'de sunulan grafiğe göre, Cam Atık ile modifiye edilen B50/70 bitümün Penetrasyon değerinin katkı oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Şekil 4.3'de sunulan grafiğe göre, Plastik Poşet Atığı ile modifiye edilen B50/70 bitümün Penetrasyon değerinin katkı oranı arttıkça azaldığı ve Cam Atık ile modifiye edilmiş bitüme göre daha çok azalma olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.4'de sunulan grafiğe göre, belirlenen oranlar ile modifiye edilmiş B50/70 bitümün penetrasyon değerinin %0,5 CA ve %1,5 PPA ile oluşturulan modifiye bitümde en düşük penetrasyon değerini verdiği belirlenmiştir. Penetrasyon testi sonuçları, tüm modifiye bitüm numunelerinin sıcaklık hassasiyetinin azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere kullanılan katkı maddelerinin artışa bağlı olarak CA, PPA ve HK bitümün içerisindeki kıvamlılığını artırdığı bu sayede daha yoğun kıvamlı bir ürün ortaya çıktığı belirlenmiştir.



Şekil 4.3 Cam tozu ve plastik poşet atık katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon deneyi sonuçları.

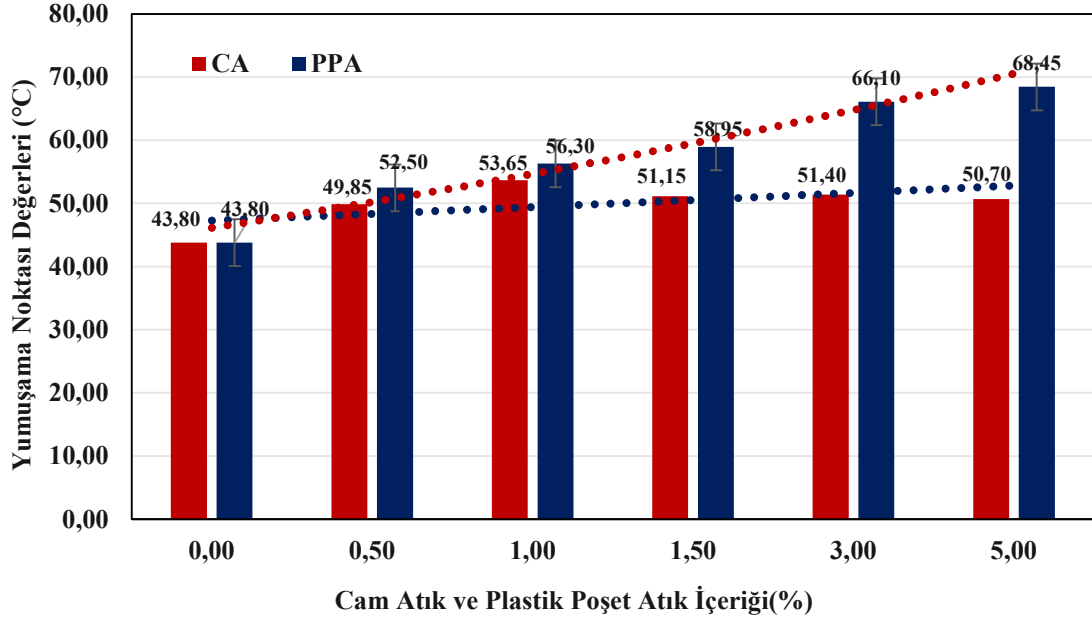


Şekil 4.4 Hibrit katkıli atık katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon deneyi sonuçları.

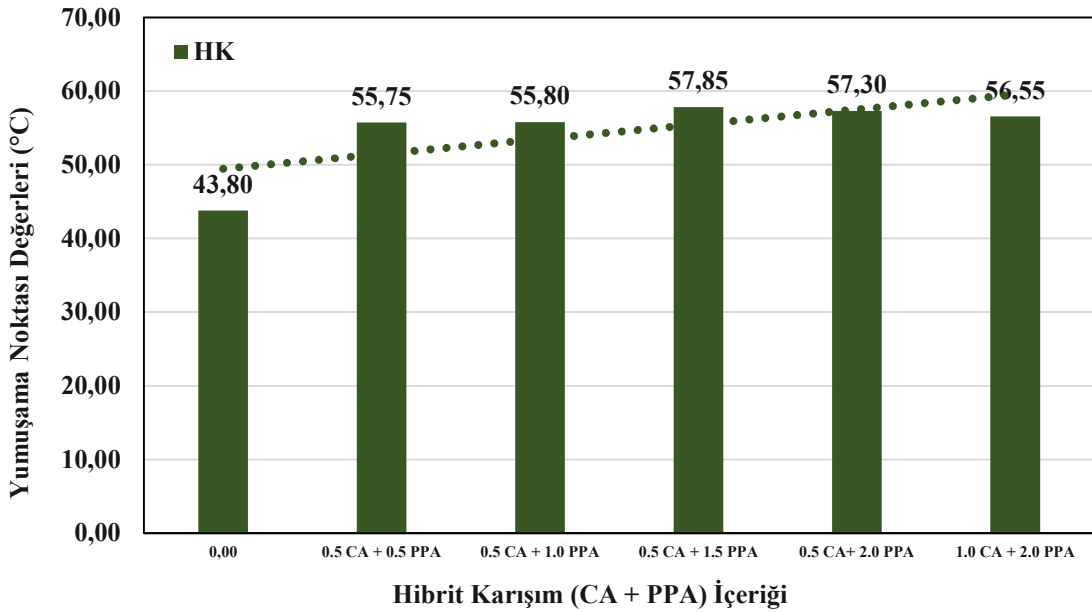
4.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Modifiye bitümlere uygulanan yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de verilmiştir. Genel olarak, her iki grafikte de, atık malzemelerle modifiye edilmiş bitümün yumuşama noktası değerleri artma eğilimindedir. Bu, modifiye edilmiş bitüm numunelerinin sıcaklık hassasiyetinin azaldığının bir göstergesidir. Şekil 4.5'de

görüldüğü gibi, %1,0 cam tozu katkısı, cam tozuyla modifiye edilmiş bitümün maksimum yumuşama noktasıdır. Plastik poşet atık katkıli numunelerde artış eğilimi, atık miktarı arttıkça devam etmektedir. Hibrit atık numune serisinde, en yüksek yumuşama noktası değeri olan 57,30 °C, 0,5CA+1,5 PPA serisi numunelerde elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Cam tozu ve plastik poşet atık katkıli modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası deneyi sonuçları.

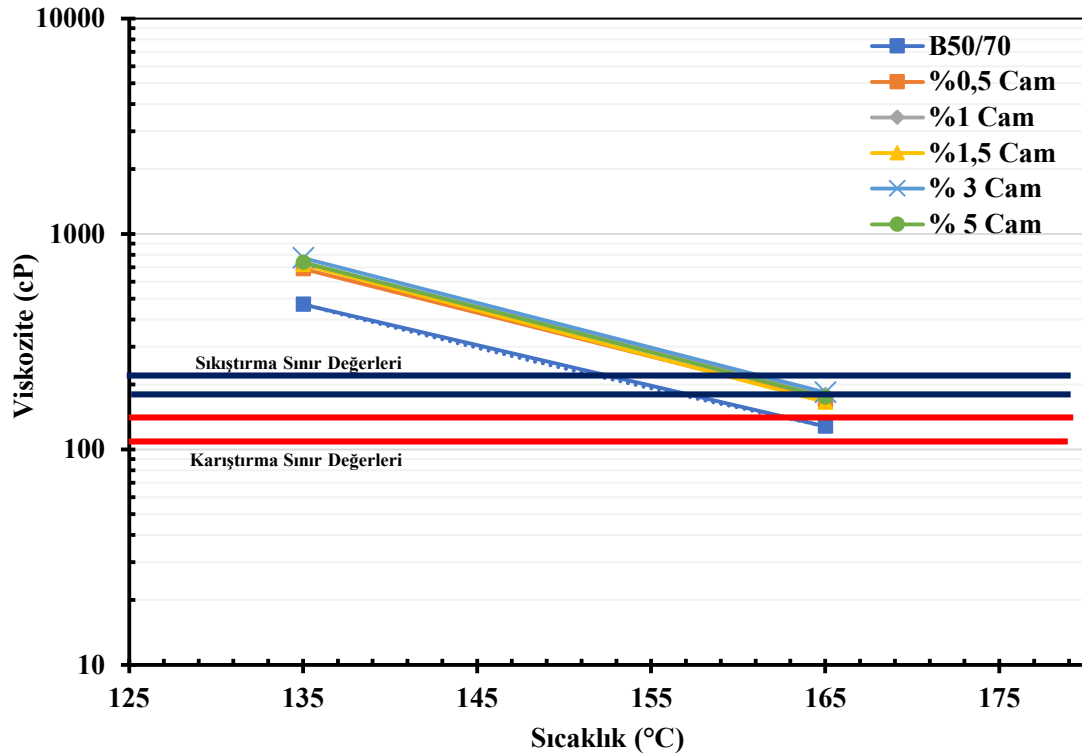


Şekil 4.6 Hibrit atık katkıli modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası deneyi sonuçları.

4.4 Dönel Viskozite Deneyi Sonuçları

Üç farklı numune türü için rotasyonel viskozite test sonuçları Şekil 4.7-4.9'da sunulmuştur. %3 CA ile modifiye edilmiş B50/70 bitüm ve %3 PPA ile modifiye edilmiş B50/70 bitümün viskozite değerleri maksimum olarak belirlenmiştir. Ancak hibrit karışım (HK) ile modifiye edilmiş bitümün maksimum viskozite değeri diğer hibrit katkı oranlarına göre en yüksek seviyede olduğu için, PPA'nın viskozite testine daha fazla etki ettiği sonucuna varılmıştır.

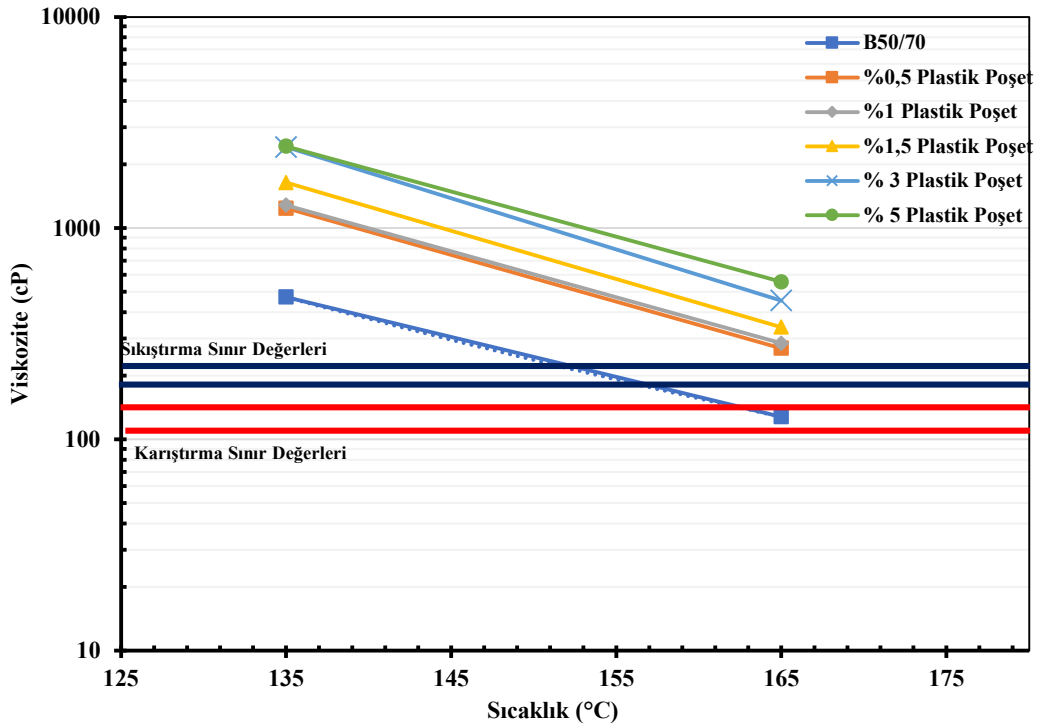
Hibrit atıklarla yapılan viskozite test sonuçları, hem 135°C hem de 165°C'de cam atık ile modifiye edilmiş B50/70 bitümün viskozite sonuçlarına kıyasla daha yüksek viskozite değerleri göstermektedir. Ayrıca kontrol numunesi olan B50/70 saf bitüme kıyasla hibrit karışımların hem sıkıştırma hem de serme sıcaklıklarında bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7 135°C ve 165°C'de 5 Farklı CA Oranı ile Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.

Şekil 4.7, cam tozu ilavesinin modifikasyonda etkili olduğunu göstermektedir. 135°C ve 165°C'de CA katkısının artışıyla viskozitede bir artış eğilimi gözlenmiş, ancak %5 katkı eklemesinden sonra azalma eğilimi ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise dalgalanmalar görülmüştür. %5 katkı eklemesinden sonra gözlenen azalma eğiliminin, yüksek miktarda CA katkısının bir kısmının çökmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Hem 135°C hem de 165°C'de %2'den fazla CA eklemesinin anlamlı olmadığı düşünülmüştür.

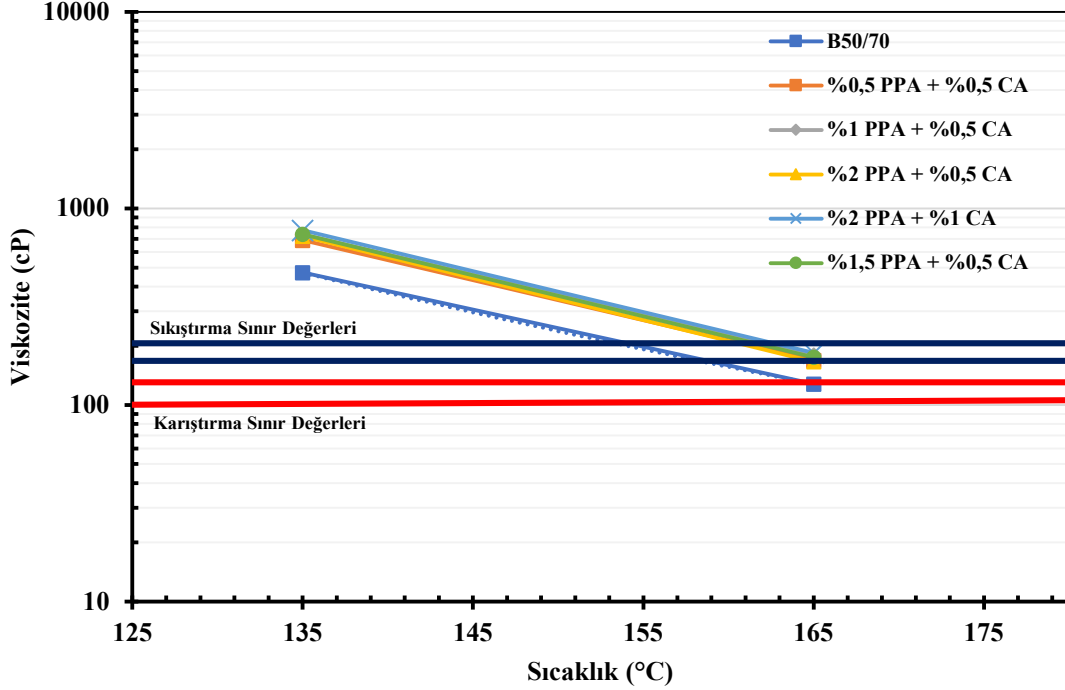
Şekil 4.8'de, genel olarak, plastik poşet katkısı ile yapılan modifikasyonda PPA miktarının artmasıyla viskozitede bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu artış eğilimi, 135°C'de %3 katkı miktarına kadar oldukça belirgindir. %3'ten yüksek katkı oranlarında viskozitedeki değişim sınırlı olsa da, artış eğilimi 165°C'de devam etmektedir.



Şekil 4.8 135°C ve 165°C'de 5 Farklı PPA Oranıyla Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.

Şekil 4.9'de, hibrit atık malzeme ilavesiyle birlikte 135°C'de %0,5 CA + %2 PPA katkı oranına kadar bir artış eğilimi olduğu, ardından viskozitede hafif bir azalma (%1 CA + %2 PPA) gözlemlendiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, bu sonuç, %0,5'ten fazla CA ilavesinin, CA'nın çökmesi nedeniyle 135°C'deki viskozite üzerinde etkili olduğunu

göstermektedir. 165°C'deki viskozite sonuçlarının, 135°C'deki sonuçlarla benzer bir eğilim izlediği gözlemlenmiştir.

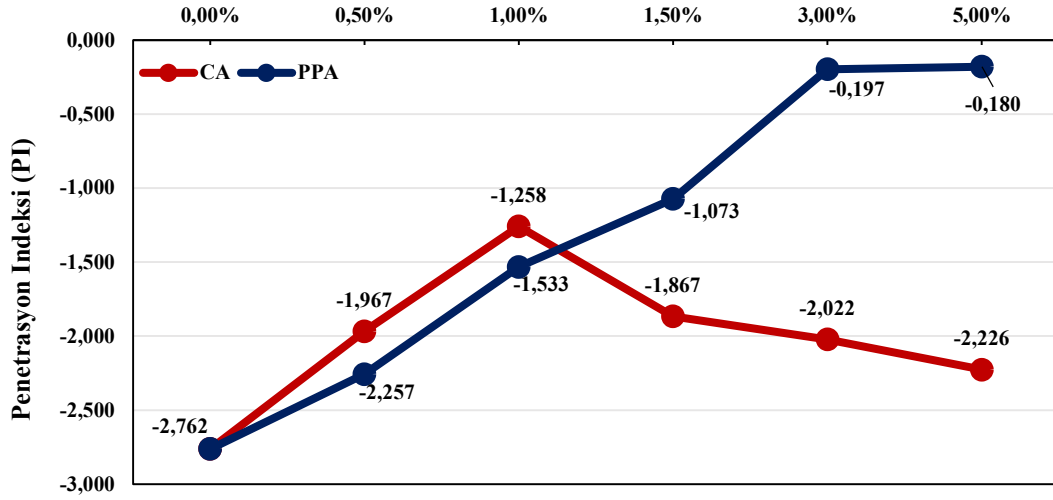


Şekil 4.9 135°C ve 165°C'de 5 Farklı Hibrit Karışım (HK) Oranı ile Modifiye Edilen Bitümün Viskozitesi Deney Sonuçları.

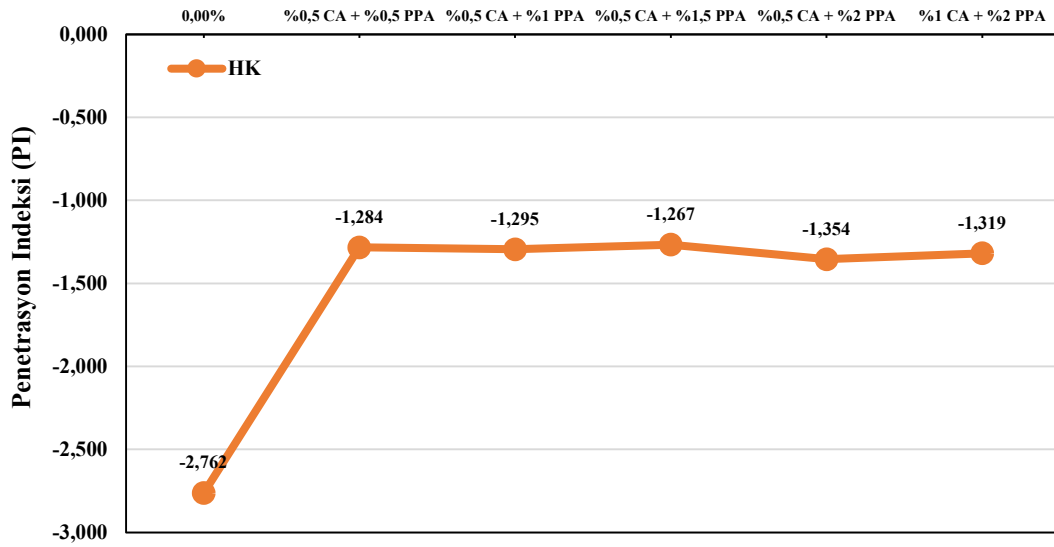
4.5 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Sonuçları

4.5.1 Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları

Penetrasyon indeksi (PI) yumuşama noktası değeri, viskozite değeri ve penetrasyon değerlerinden belirli denklemler ile hesaplanarak bulunan bir değerdir. Penetrasyon indeksinin yüksek olması kaplamaların ısı altında kalıcı hasarlara karşı daha mukavemetli olması anlamına gelmektedir. CA, PPA ve HK ile modifiye edilmiş B50//70 bitüm numunelerine ait penetrasyon indeksi grafikleri Şekil 4.10-4.11'de verilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, %5 oranında PPA ile modifiye edilmiş bitümün diğer PPA ile modifiye edilmiş bitümlere oranla, %1 oranında CA ile modifiye edilmiş bitümün ise diğer CA ile modifiye edilmiş bitümlere oranla PI değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10 Plastik atığı katkıli modifiye bitüm ve Cam tozu atığı katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksi grafiği.

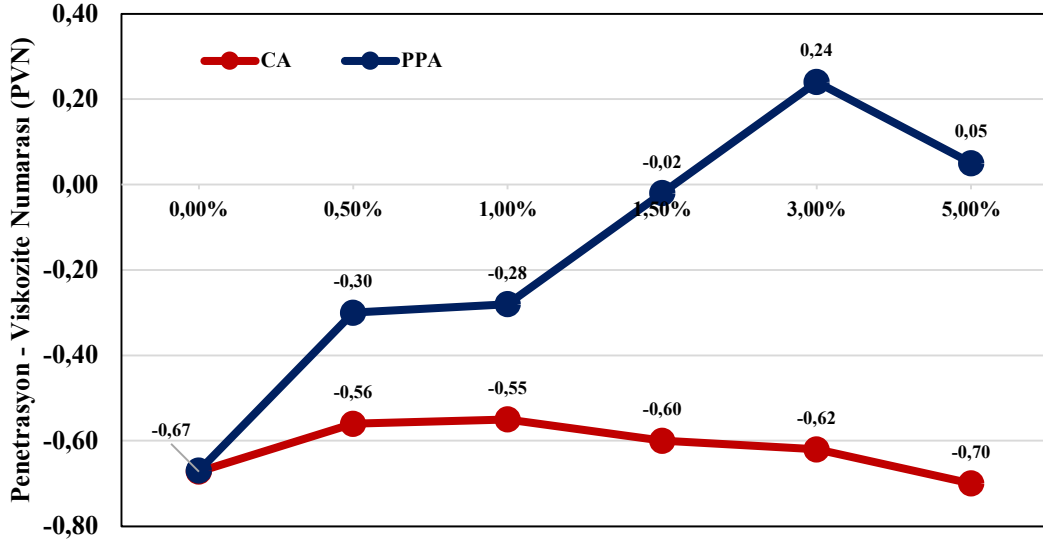


Şekil 4.11 Hibrit atık katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon indeksi grafiği.

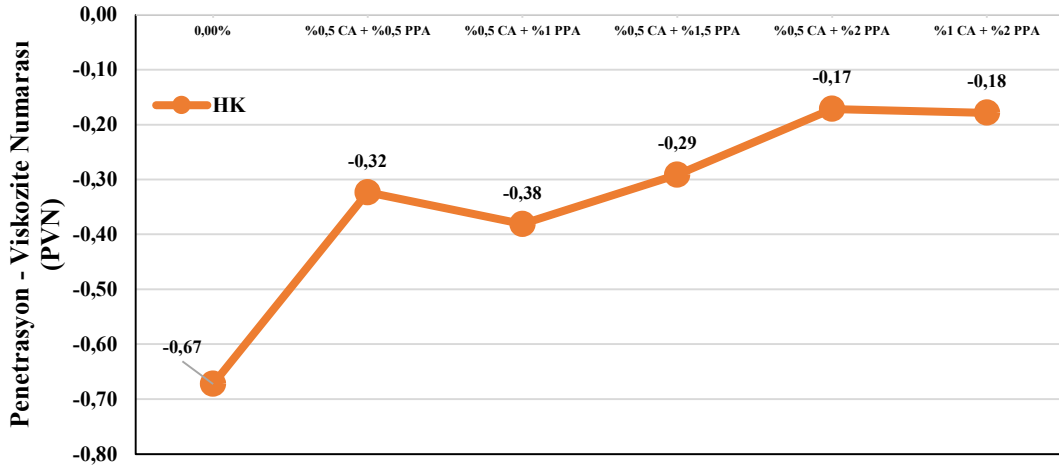
4.5.2 Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN) Sonuçları

Penetrasyon viskozite numarası (PVN) bitümün ısı hassasiyetini belirlemek için penetrasyon değeri, viskozite değerleri ve yumuşama noktası değerlerinin bir bileşkesi olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan PVN numarasının 0'a yakın olması bitüm sıcaklık hassasiyetinin düşük olduğu anlamına gelmektedir. Sıcaklık hassasiyetinin azaltılması

kaplama ömrünün uzatılması için önemli bir parametredir. Modifiye bitüm numunelerine ait penetrasyon viskozite numarası (PVN) grafikleri Şekil 4.12-4.13’de verilmiştir.



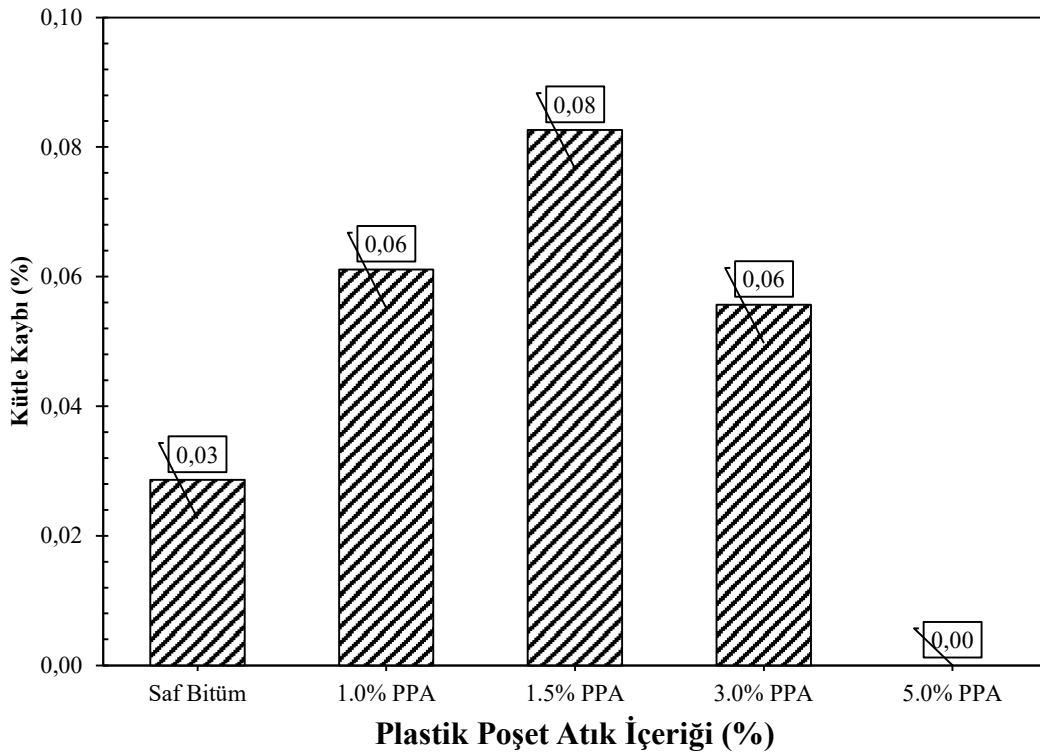
Şekil 4.12 PPA katkıli modifiye bitüm ve CA katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon viskozite numarası (PVN) grafiği.



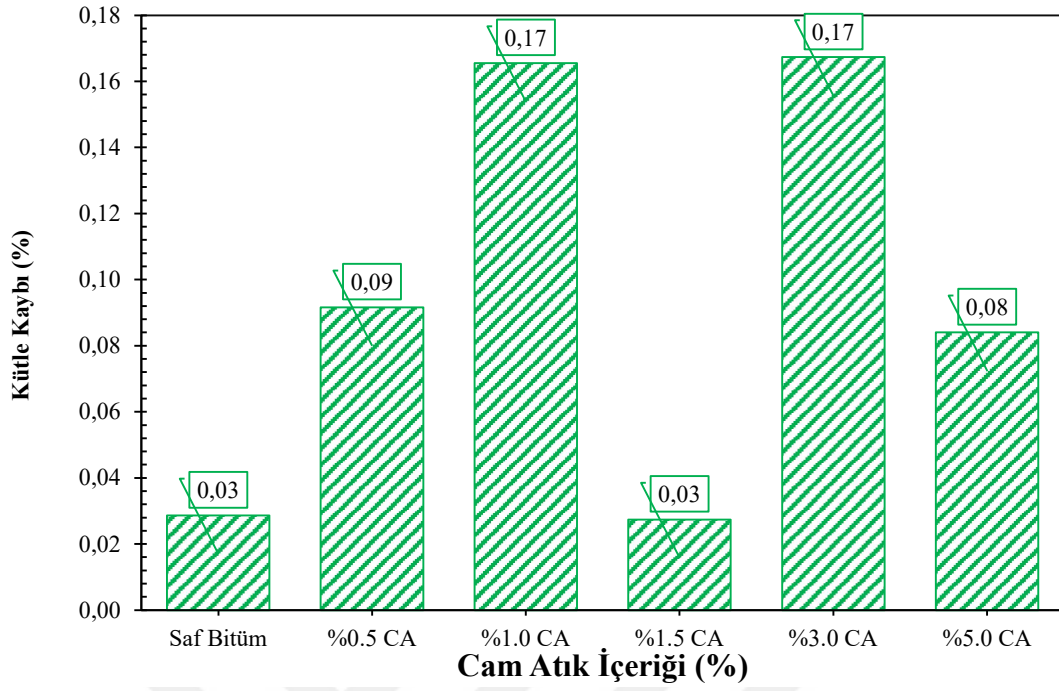
Şekil 4.13 Hibrit katkıli modifiye bitüm numunelerinin penetrasyon viskozite numarası (PVN) grafiği.

4.6 Dönel İnce Film Fırını (RTFO) ile Kısa Dönem Yaşlandırma Deneyi Sonuçları

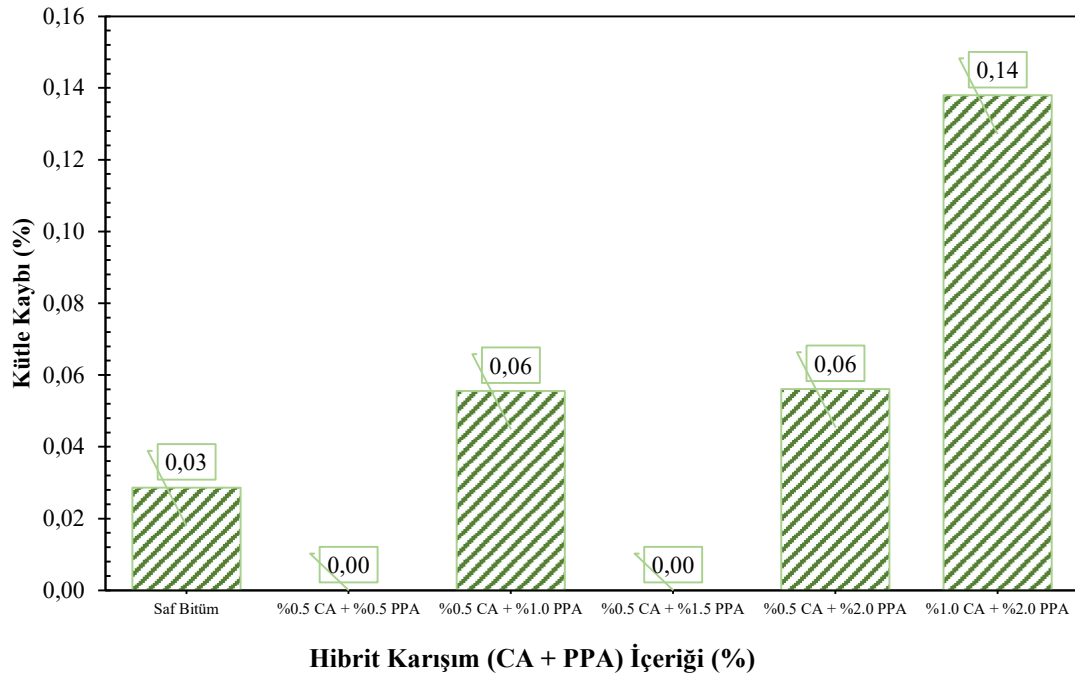
Farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) CA, (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) PPA ve (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) ile modifiye edilen B50/70 bitümlere uygulanan RTFOT deneyi sonuçları Şekil 4.14-4.16'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deney öncesi ve deney sonrası kütle kayıpları meydana geldiği görülmektedir. Plastik poşet atık ile modifiye edilmiş bitüme RTFOT deneyi uygulandıktan sonra verilen sonuçlara göre en çok kütle kaybı %1,5 Plastik poşet atık ile modifiye edilmiş bitümde görüldüğü tespit edilmiştir. Cam atık ile modifiye edilmiş bitüm deney sonuçlarına bakıldığında kütle kayıpları en çok %1,0 ve %3,0 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. Cam atık ile modifiye edilmiş bitümlerin plastik poşet atıkları ile modifiye edilmiş bitüme göre daha çok kütle kaybı yaşadığı belirlenmiştir. Hibrit karışımlarda ise en çok kütle kaybının %1,0 CA + %2,0 PPA numunesinde meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.14 PPA katkıli modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.



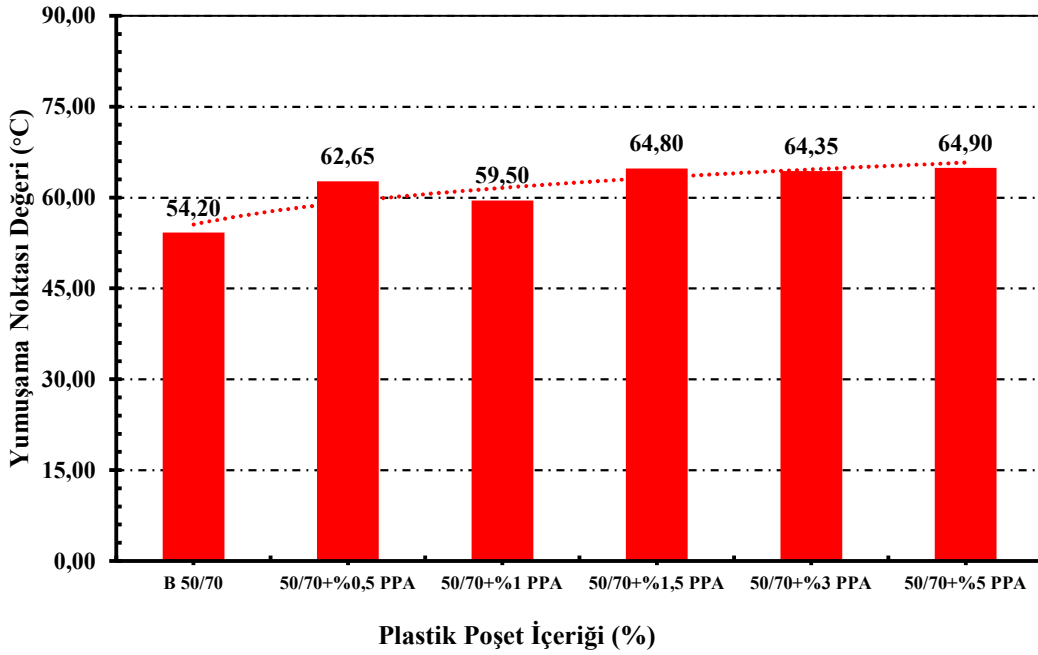
Şekil 4.15 CA katkıli modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.



Şekil 4.16 Hibrit katkıli modifiye bitümlerin RTFOT deney sonuçları.

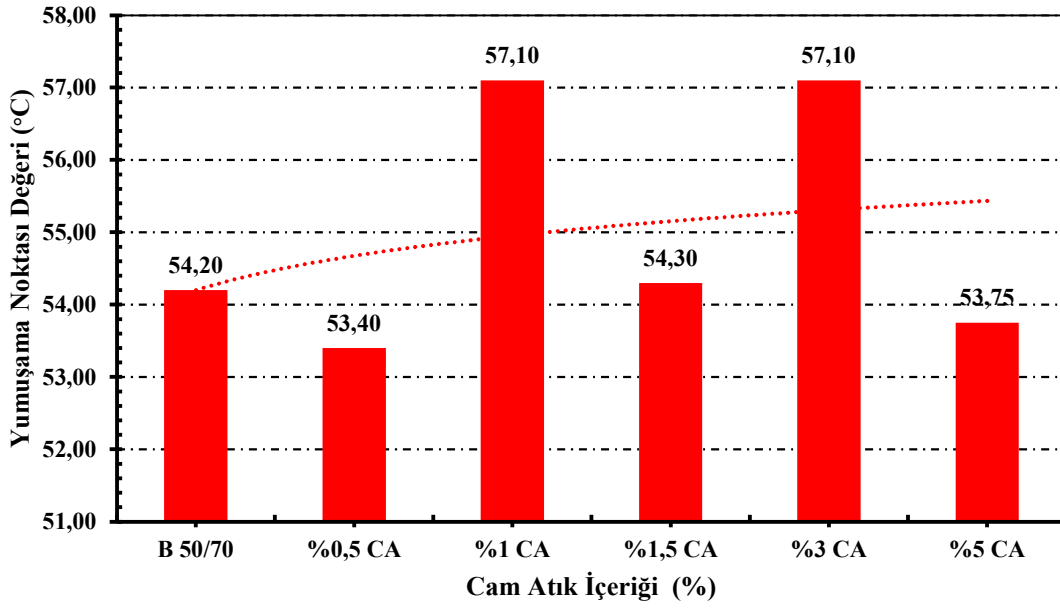
Farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) CA, (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) PPA ve (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) ile modifiye

edilmiş bitümlere RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası ve viskozite deneyleri yapılmıştır. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları Şekil 4.17-4.19’de verilmiştir. (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) oranlarında Plastik poşet atık ile modifiye edilmiş bitüme RTFOT deneyi sonrası uygulanan yumuşama noktası deneyine göre yumuşama noktası değeri %1,5 oranına kadar artış eğilimi gösterip %3 ve %5 katkılı modifiye bitümlerde yumuşama noktası değeri yükselmeyip yatay bir grafik çizdiği görülmektedir.

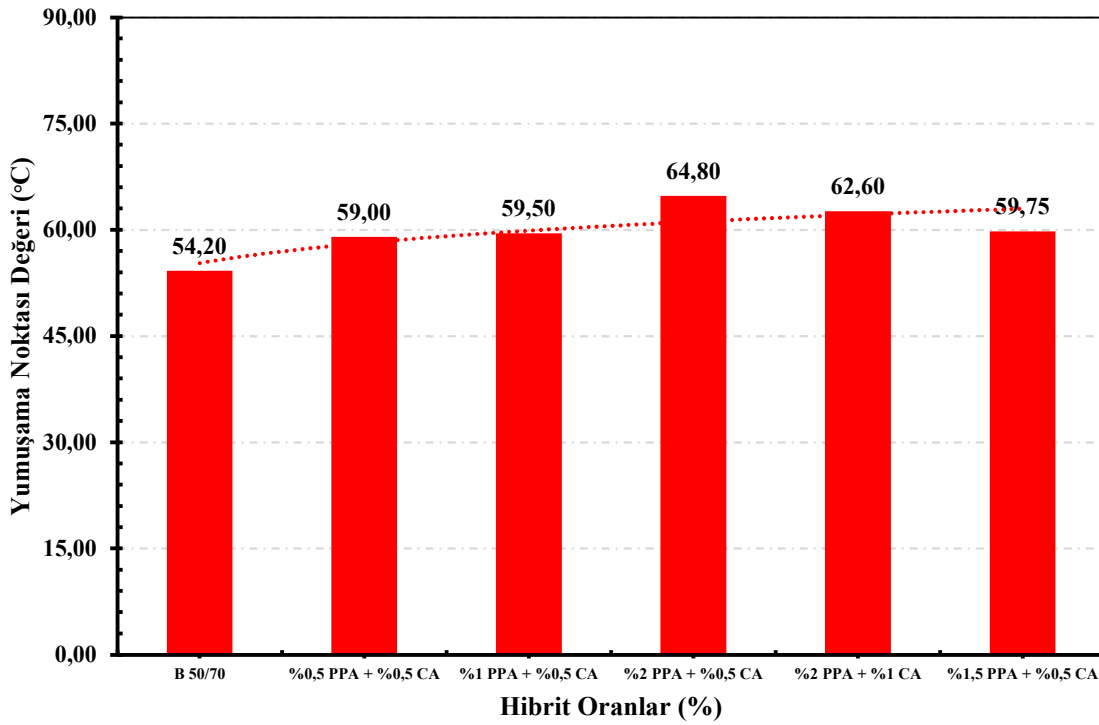


Şekil 4.17 PPA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.

Farklı oranlarda (%0,5, 1, 1,5, 3, 5) Cam atık ile modifiye edilmiş bitüme RTFOT deneyi sonrası uygulanan yumuşama noktası deneyi sonuçları Şekil 4.18’de görülmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre en yüksek yumuşama noktası değeri %1 ve %3 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Farklı oranlarda (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) hibrit karışımlar ile modifiye edilmiş B50/70 bitüme RTFOT sonrası uygulanan yumuşama noktası değerleri Şekil 4.19’da görülmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre %2 PPA + %0,5 CA oranları ile modifiye bitüm hibrit karışıma kadar yumuşama noktası değeri artış göstererek ilerlemiş olup sonraki oranlarda kademeli olarak düşüş olduğu görülmüştür.

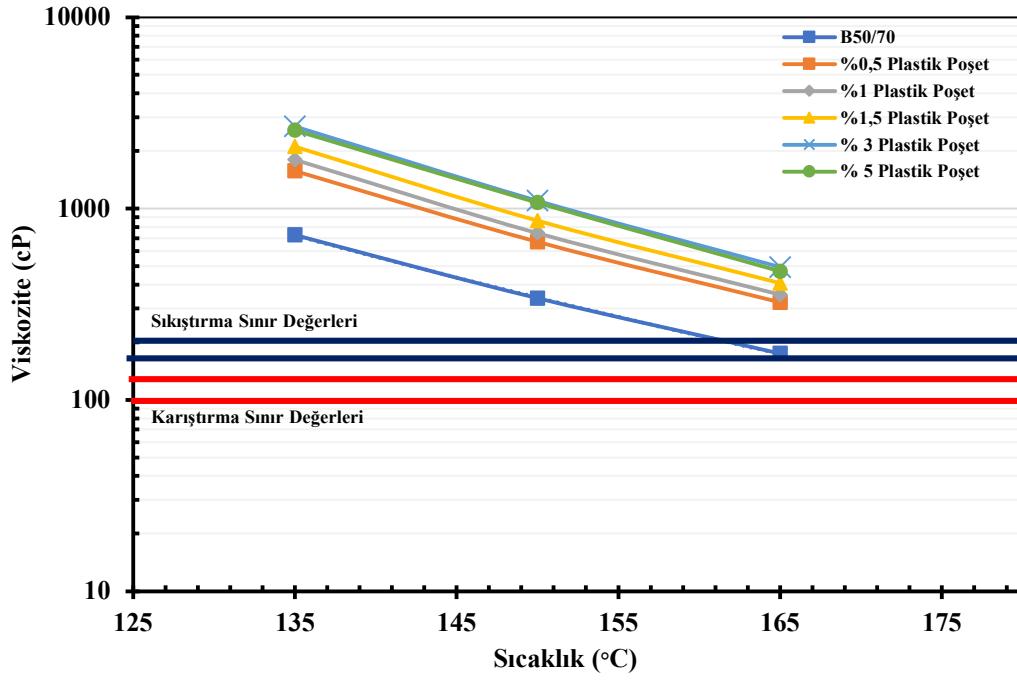


Şekil 4.18 CA katkıli modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.

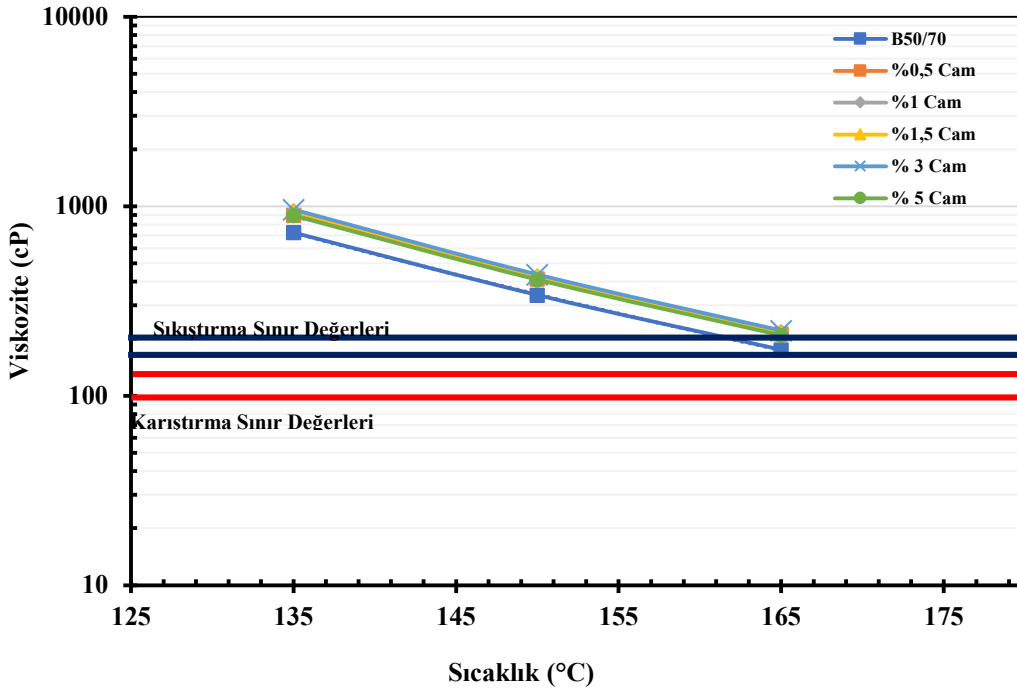


Şekil 4.19 Hibrit katkıli modifiye bitümlerin RTFOT sonrası yumuşama noktası deney sonuçları.

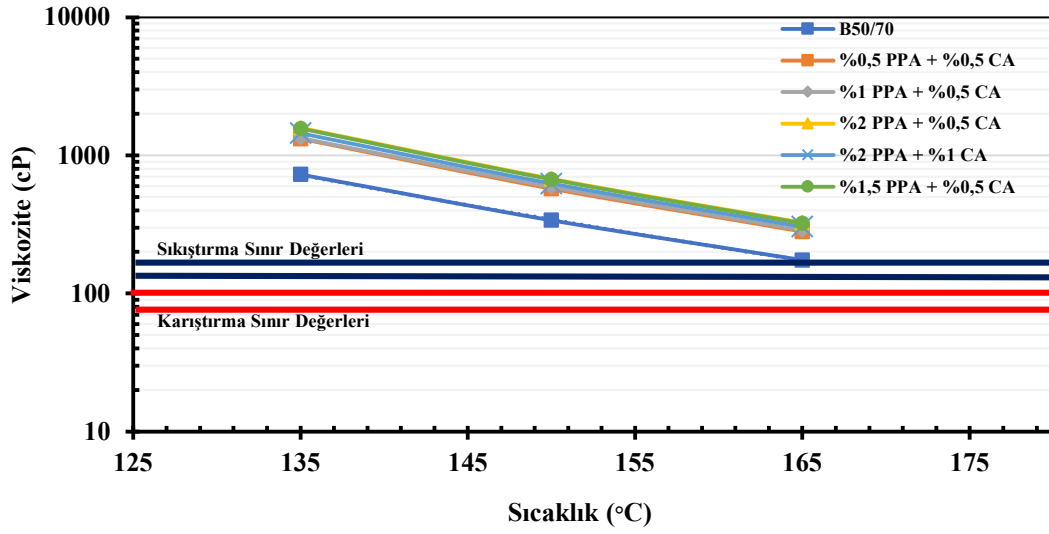
RTFOT sonrası viskozite deneyi sonuçları Şekil 4.20-4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.20 PPA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.



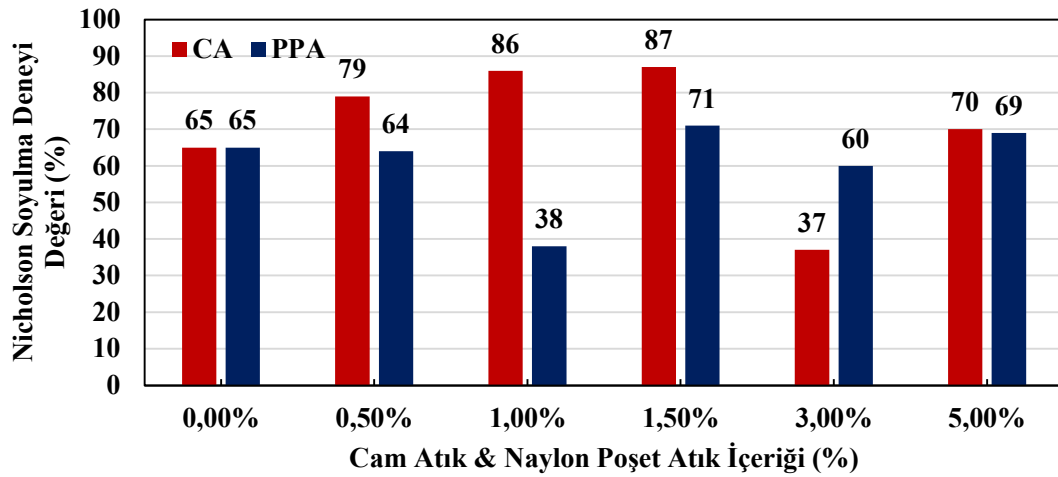
Şekil 4.21 CA katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.



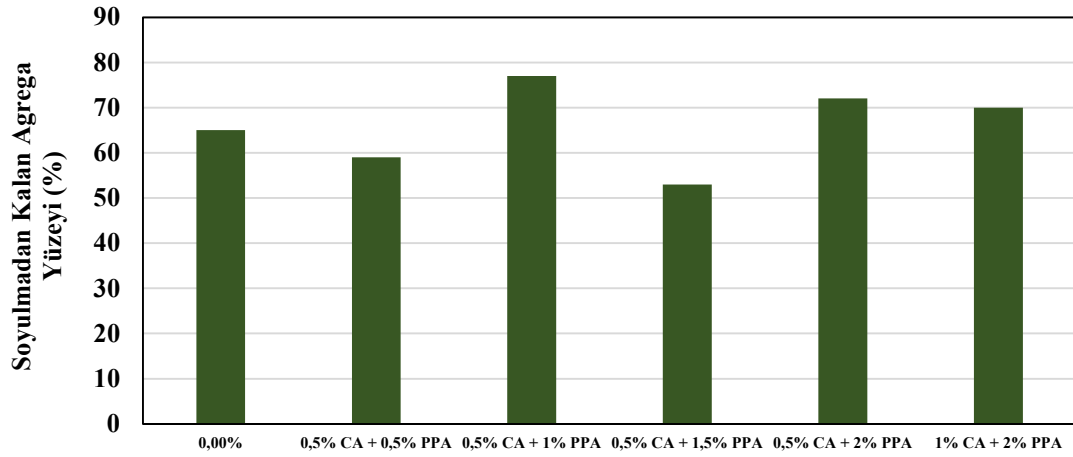
Şekil 4.22 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin RTFOT sonrası viskozite deney sonuçları.

4.7 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Soyulma etkisini belirlemek için Nicholson soyulma testi yapılmış ve Şekil 4.23'de sunulan grafiğe göre, %1,0 CA katkısı ve %1,5 PPA katkısı ile modifiye edilmiş bitümde en büyük soyulmamış agrega yüzeyi gözlemlenmiştir. Şekil 4.24'e göre ise, %0,5 CA ve %1,0 PPA katkısıyla oluşturulan hibrit katkılı bitümde en büyük soyulmamış agrega yüzeyi tespit edilmiştir.



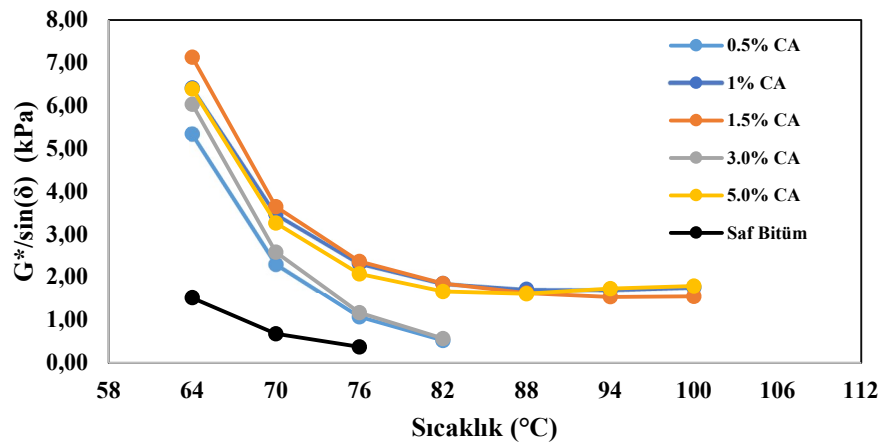
Şekil 4.23 CA ve PPA ile modifiye edilmiş bitümlerin Nicholson deney sonuçları.



Şekil 4.24 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin Nicholson deney sonuçları.

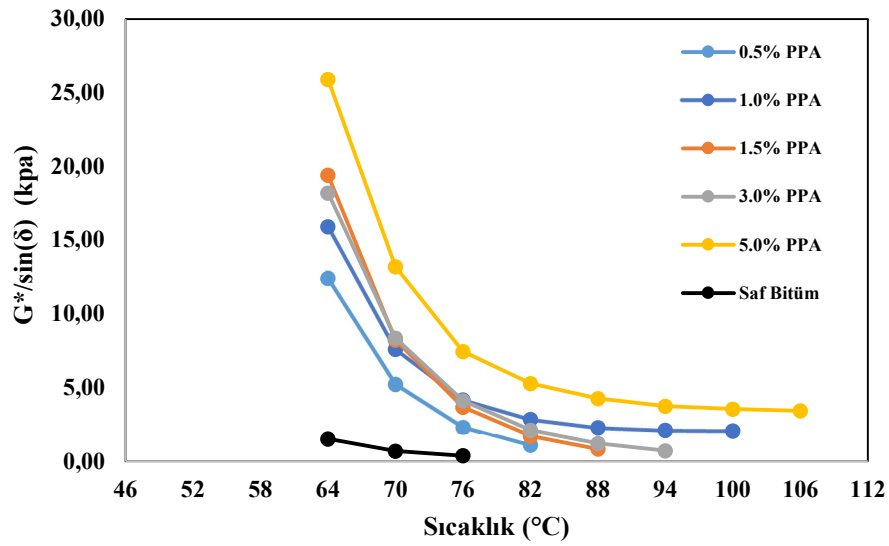
4.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

Cam tozu (CA), plastik poşet (PPA) ve hibrit atık serisi numuneleri üzerinde yapılan DSR test sonuçlarının grafikleri Şekil 20-25'de verilmiştir. Cam atığı ile modifiye edilmiş numunelerde, kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde $G^*/\sin\delta$ parametresinin artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak en belirgin artış, 64°C 'de %0.5 katkı içeren numunede görülmüştür. Sıcaklık arttıkça, tüm numunelerde olduğu gibi, CA ile modifiye edilmiş numunelerde de $G^*/\sin\delta$ parametresi azalma eğilimi göstermiştir. Genel olarak, CA ile modifiye edilen numunelerin tekerlek izi direncinin kontrol numunelerinden daha iyi olacağı gözlemlenmiştir (Şekil 4.25).



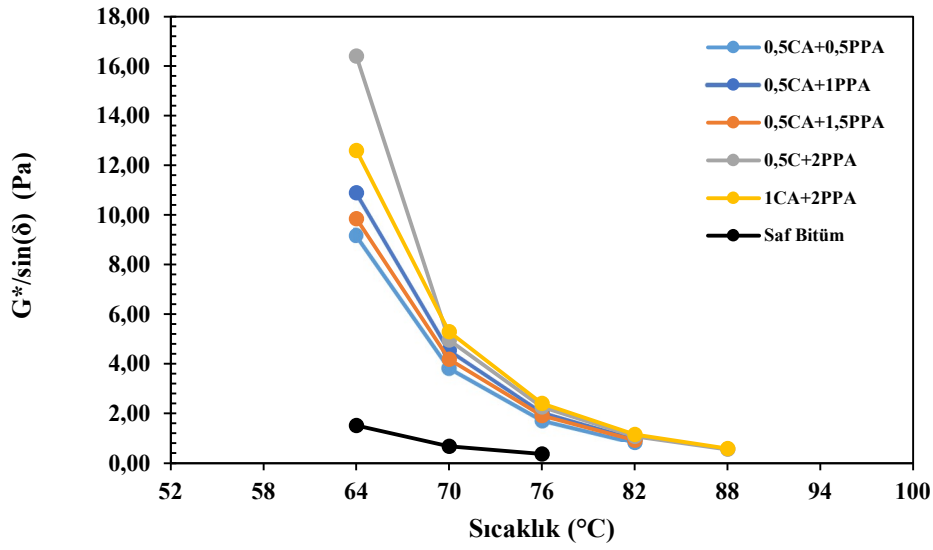
Şekil 4.25 CA katkılı modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.

Plastik poşet atığı miktarının artışıyla birlikte $G^*/\sin\delta$ parametresinde düzenli ve istikrarlı bir artış gözlemlenmiş, kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde $G^*/\sin\delta$ parametresi iyileşme göstermiştir. En yüksek iyileşmenin %5 PPA içeriğinde olduğu görülmektedir. PPA ile modifiye edilmiş numunelerin tekerlek izi direncinin oldukça iyi olacağı düşünülmektedir (Şekil 4.26). Tekerlek izi oluşumunu önlemek için $G^*/\sin\delta$ parametresinin en az 1 kPa olması gerekmektedir (Akbulut ve Gürer 2022).



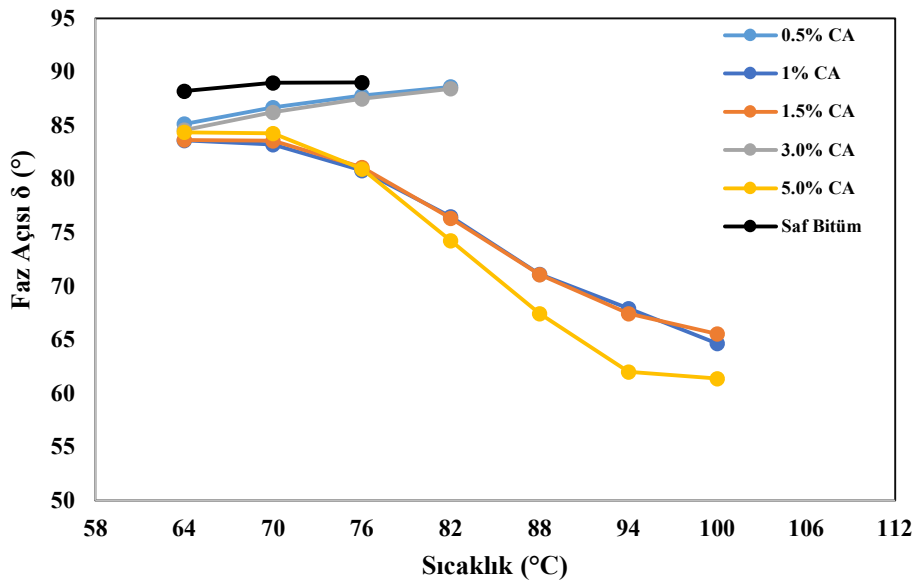
Şekil 4.26 PPA katkılı modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.

Farklı oranlarda (%0,5 CA + 0,5 PPA; 0,5 CA + 1,0 PPA; 0,5 CA + 1,5 PPA; 0,5 CA + 2,0 PPA; 1,0 CA + 2,0 PPA) hibrit atık ile modifiye edilmiş B50/70 bitüm numunelerinde, kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde $G^*/\sin\delta$ parametresinin artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak en belirgin artış, 64°C'de %0,5 CA + 2,0 PPA serisi numunede görülmüştür. Sıcaklık 70°C'ye yükseldikçe, $G^*/\sin\delta$ parametresi tüm numunelerde birbirine yaklaşmış, ancak kontrol numunesinden daha yüksek olmuştur. Genel olarak, hibrit atık ile modifiye edilen numunelerin tekerlek izi gibi deformasyon oluşumlarına karşı direncinin kontrol numunelerinden daha iyi olacağı gözlemlenmiştir (Şekil 4.27).

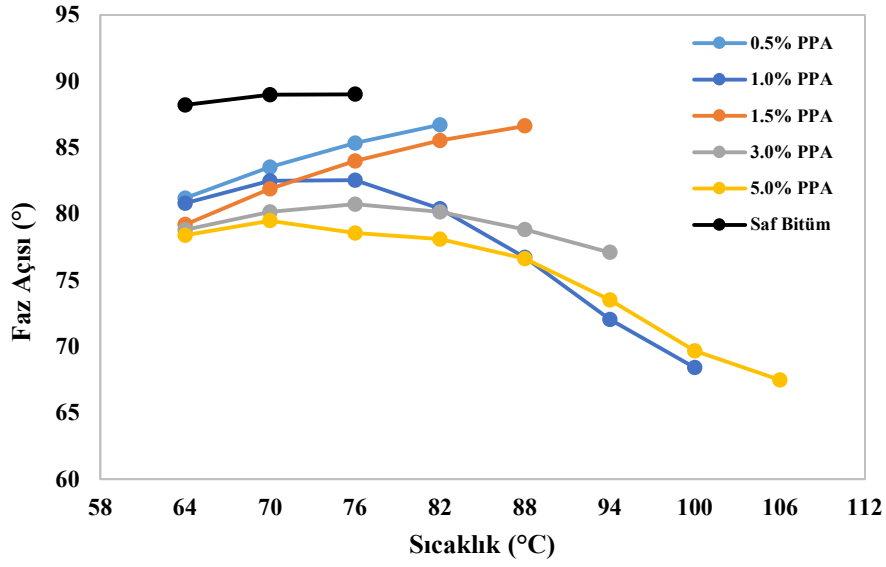


Şekil 4.27 Hibrit katkıli modifiye bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresinin değişimi.

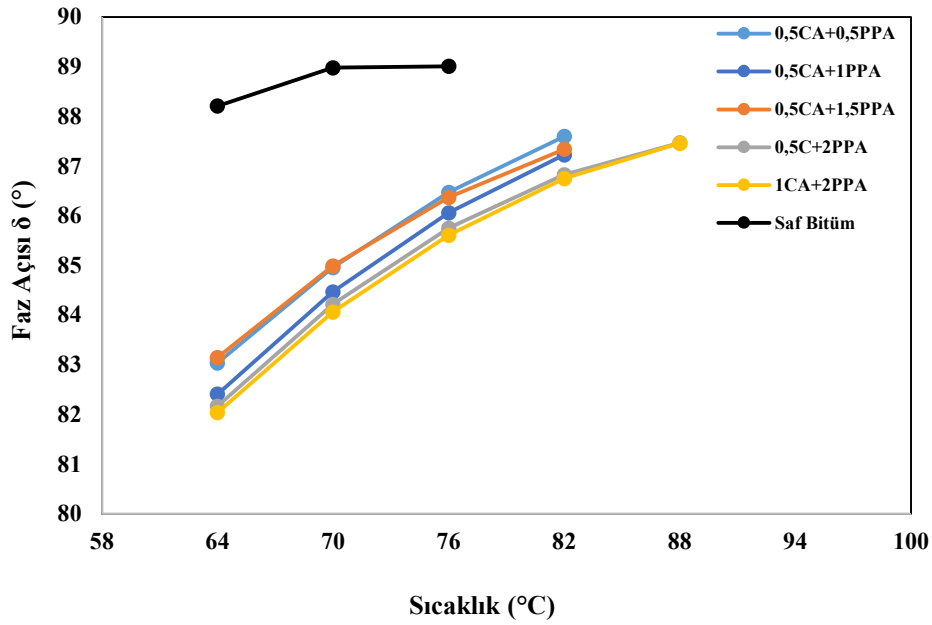
Tüm serilerdeki numunelerde (PPA, CA ve HK) faz açısı değerlerinin azalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. 64°C'de en yüksek azalma sırasıyla PPA, HK ve CA numunelerinde olmuştur. Yılmaz ve Kök'ün (2008) belirttiği gibi, bu azalma değerleri, bu modifiye bitümlerle üretilen asfalt kaplamaların daha esnek bir davranış sergileyeceği anlamına gelmektedir (Şekil 4.28-4.30).



Şekil 4.28 CA katkıli modifiye bitümlerin faz açısı δ (°) parametresinin değişimi.



Şekil 4.29 PPA katkılı modifiye bitümlerin faz açısı δ (°) parametresinin değişimi.



Şekil 4.30 Hibrit katkılı modifiye bitümlerin faz açısı δ (°) parametresinin değişimi.

4.9 Optimum Katkı Yüzdesinin Belirlenmesi

Tüm fiziksel ve reolojik test sonuçları için en iyi performansı gösteren bitüm yüzdeleri belirlendikten sonra, bu bitüm yüzdeleri ortalanmış ve en yakın numune yüzdesine

yuvarlanmıştır. Bu şekilde, optimum modifiye bitüm numuneleri belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre, plastik poşet atığı serisi numunelerde %3,0, cam tozu atığı serisi numunelerde %0,5 ve hibrit serisi numunelerde %0,5 cam tozu atığı + %1,5 plastik poşet atığı, optimum katkı maddesi içeren numuneler olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 Optimum katkı miktarlarının belirlenmesi.

Bitüm Testi	Belirlenen Modifikasyon Miktarı (%)		
	PPA Serisi	CA Serisi	Hibrit Seri
Özgül Ağırlık Testi	-	0,5	2,5
Penetrasyon Testi	3,0	0,5	2,0
Yumuşama Noktası Deneyi	3,0	1,0	2,0
Dinamik Kesme Testi	5,0	1,0	2,5
Nicholson Soyma Testi	1,5	0,5	1,5
Döner Viskozite Testi	3,0	1,0	2,0
Ortalama Değerler	3,1	1,0	1,8
Kararlı Seri	3,0% PPA	1,0 CA	0,5 CA+1,5 PPA

4.10 Maliyet Analizi

Modifiye edilmiş bitüm ile kaplama için 1 m² ve 5 cm kalınlıkta birim fiyat analizi yapılmıştır (Çizelge 4.2). Birim fiyat analizinde literatüre dayalı karşılaştırma için SBS maddesi de dikkate alınmıştır. Karşılaştırmada fayda olarak referans numuneye göre G*/sinδ parametresindeki % iyileştirme düzeyi esas alınmıştır. SBS, PPA, CA ve hibrit atık modifikatörleri ile 1 m² 5 cm kalınlığında asfalt üretildiğinde F/M oranları sırasıyla 0,07, 0,256, 0,134 ve 0,202 olarak hesaplanmıştır. "Fayda" değerleri hesaplanırken karbon ayak izinin azaltılması, çevre koruma, atık bertarafı vb. hususların dikkate alınmadığı unutulmamalıdır. Sonuçlar bitüm modifikasyonu açısından en faydalı atıkların sırasıyla PPA, Hibrit ve CA olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.2 Maliyet analizi.

Nº	Poz Numarası	Açıklama	Birim	Miktar	SBS* Birim Fiyat	PPA Birim Fiyat /£/ton	CA Birim Fiyat /£	Hibrit Karışım Birim Fiyat /£
1	-	Modifikatör birim fiyatı	ton	0,03/0,03/ 0,01/0,02	97,27	1,01	0,32	0,72
2	KGM/6400-1	Asfalt Beton Aşınma Katmanı Malzemelerinin (Kırılmış ve Elenmiş Sert Taş ile) Tip 1 Temini	ton	0,12	322,80	322,80	322,80	322,80
3	KGM/4378	Her Türlü Asfalt Makinesi ile Süpürme	da	0,001	303,58	303,57	303,57	303,57
4	04.611/1A	Katyonik asfalt emülsiyonu (Tip CRS-1) ile astar uygulaması.	kg	0,2	10,88	10,88	10,88	10,88
5	KGM4398	Distribütör Makinesi ile Yapıştırıcı Bitüm Malzemesinin Püskürtülmesi	da	0,001	609,33	609,33	609,33	609,33
6	KGM/4440/M	Büyük tesis ünitesinde asfalt beton kaplamanın hazırlanması için gereken ek çalışmalar	ton	0,12	493,27	493,27	493,27	493,27
7	KGM/4436/2	Büyük tesis ünitesinde polimer modifiye bitüm kullanılarak "asfalt beton kaplama" ve "bitümlü sıcak karışım taban tabakası" hazırlanması için gerekli ek işler	ton	0,12	63,10	63,10	63,10	63,10
8	KGM/4300/PM B	Özel bir tesiste modifiye bitümün hazırlanması	ton	0,00576	1397,4	1397,4	838,92	1397,4
DSR sonuçlarına göre fayda			%	-	230	821	353	648
TOPLAM MALİYET (£) (1 m²)					3298,4	3201,5	2641,9	3201,2
Fayda / Maliyet					0,07	0,256	0,134	0,202

5. SONUÇLAR

İki farklı atık türü (CA ve PPA) ayrı ayrı ve hibrit olarak 5 farklı yüzde kullanılarak modifiye edilmiş bitüm numuneleri üzerinde fiziksel ve reolojik bitüm testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar kontrol bitüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Farklı atıklarla modifiye edilen bitüm numunelerinde hem reolojik hem de fiziksel özelliklerin önemli ölçüde iyileştiği gözlemlendi.
- Çalışma sonucunda, optimum modifiye edici miktarları PPA, CA ve hibrit seriler için sırasıyla %3,0, %1,0 ve %2,0 (0,5 CA + 1,5 PPA) olarak belirlenmiştir.
- Hem penetrasyon hem de yumuşama noktası testlerinin sonuçlarına göre, modifiye edilmiş tüm numunelerin sıcaklık hassasiyetinin azaldığı anlaşılmaktadır. Nitekim modifiye edilmiş numunelerde hesaplanan penetrasyon indeksi değeri artma eğilimindedir, bu da sıcaklık hassasiyetinin azaldığının bir göstergesidir.
- Döner viskozite testi sonuçlarına göre, tüm seri numunelerin viskozite değerlerinde 135 ve 165 oC sıcaklıklarda artış eğilimi olduğu, kontrol numunesine göre en yüksek artış eğilimlerinin sırasıyla PPA, Hibrit atık ve CA numunelerinde olduğu belirlenmiştir.
- DSR test sonuçlarına göre, tüm numunelerin yüksek sıcaklıklarda kontrol numunelerine göre daha esnek davranış göstereceği ve tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerinin daha yüksek olacağı belirlenmiştir.
- Soyulma direnci açısından CA ve Hibrit numunelerin PPA serisine göre daha iyi davranış sergilediği düşünülmektedir.

- Fayda/Maliyet analiz sonuçlarına göre, SBS ile modifiye edilmiş örneklerde bu oran 0,07 iken, PPA, CA ve hibrit atık örneklerinde sırasıyla 0,256, 0,134 ve 0,202 gibi oldukça yüksek elde edilmiştir. Burada belirlenen "fayda" değeri $G^*/\sin\delta$ parametresindeki iyileştirme hususuna dayanmaktadır; “çevreyi koruma, karbon ayak izini azaltma, atık bertarafı vb. faydalar” hesaplamada gözönüne alınmamıştır. Belirtilen faydalar göz önüne alındığında, hesaplanan bu F/M oranlarının beklenenden daha yüksek olacağı değerlendirilmiştir.
- Gelecekteki çalışmalarda bu modifiye bitümlerin bitümlü karışımlar olarak davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.
- Yapılan çalışmada, plastik poşet ve cam atıklarının hem ayrı ayrı hem de hibrit olarak kullanılmasının, bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlayacağı, böylece önemli miktarda atık malzemenin bertaraf edilebileceği ve çevrenin korunmasına da önemli katkı sağlanacağı sonucuna ulaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Ahmadinia E, Zargar M, Karim M R, Abdelaziz M, Shafigh P, 2011, Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials design*, 32(10), 4844-4849.
- Akbulut H, Gürer C, 2022, Investigation of the performance of silicone rubber modified bitumen, *Silicon*, 14(15), 9721-9731.
- Al-Hadidy A, Yi-qiu T, 2009, Effect of polyethylene on life of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456-1464.
- Alghrafy Y M, El-Badawy S M, Abd Alla E S M, 2021, Rheological and environmental evaluation of sulfur extended asphalt binders modified by high and low density polyethylene recycled waste, *Construction and Building Materials*, 307, 125008.
- Almahdi B A, Ahmeda A G, Adwan I, Ladin M A, 2021, Feasibility of utilizing waste polyethylene terephthalate as replacement in asphalt binder mixture, *Knowledge-Based Engineering and Sciences*, 2(1), 47-57.
- Appiah, J. K, Berko-Boateng, V. N, Tagbor T A, 2017, Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case studies in construction materials*, 6, 1-7.
- ASTM D2872, 2006, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM D70-03, 2003, Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). *Annual Book of ASTM Standards*, Pennsylvania.
- ASTM D7175, 2015, Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, Pennsylvania.
- Arıkan E, 1997, Sathi Kaplamalarda Su Etkisi Altında, Agregası İle Bitümlü Bağlayıcı Arasındaki Yapışma Yeteneğinin, Kullanılan Malzemelere Bağlı Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124, Ankara.

- Attaelmanan M, Feng C P, Al-Hadidy A, 2011, Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764-2770.
- Behnood A, Gharehveran M M, 2019, Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders, *European Polymer Journal*, 112, 766-791.
- Brasileiro L L, Moreno-Navarro F, Martínez R T, del Sol-Sánchez M, Matos J M E, del Carmen Rubio-Gámez M, 2019, Study of the feasibility of producing modified asphalt bitumens using flakes made from recycled polymers, *Construction and Building Materials*, 208, 269-282.
- Brooks A L, Wang S, Jambeck J R, 2018, The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade, *Science advances*, 4(6), eaat0131.
- Chesner W H, Collins R J, MacKay M H, Emery J, 2002, User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction, *Recycled Materials Resource Center*, 475, New Hampshire.
- Copeland A, 2011, Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice, United States. Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, 60, United States.
- Costa L M, Silva H M, Peralta J, Oliveira J R, 2019, Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification—Performance and morphological assessment, *Construction and Building Materials*, 198, 237-244.
- Dalhat M, Al-Adham K, 2023, Review on laboratory preparation processes of polymer modified asphalt binder, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 159-184.
- Dalhat M A, Al-Abdul Wahhab H, 2017, Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia, *International journal of pavement engineering*, 18(4), 349-357.
- Donavan P R, Janello C J, 2021, Results of the 10-Year Arizona Quiet Pavement Pilot Program, *Transportation Research Record*, 2675(9), 1040-1048.

- Du B, Li R, Guo F, Cai R, Pei J, 2023, Evaluation of Rheological and Microscopic Properties of SBS-Modified Asphalt Binder with Multiple Regeneration, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(12), 04023461.
- Du Z, Jiang C, Yuan J, Xiao F, Wang J, 2020, Low temperature performance characteristics of polyethylene modified asphalts—A review, *Construction and Building Materials*, 264, 120704.
- El-Naga I A, Ragab M, 2019, Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 219, 81-90.
- Emtiaz M, Imtiyaz M N, Majumder M, Idris I I, Mazumder R, Rahaman M M, 2023, A comprehensive literature review on polymer-modified asphalt binder, *CivilEng*, 4(3), 901-932.
- Farahani H, Palassi M, Galooyak S, 2018, Rheology investigation of waste LDPE and crumb rubber modified bitumen, *Engineering Solid Mechanics*, 6(1), 27-38.
- Fattah M Y, Abdulkhabeer W, Hilal M M, 2021, Characteristics of asphalt binder and mixture modified with waste polypropylene, *Engineering and Technology Journal*, 39(8), 1224-1230.
- Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S, 2009, Recent developments in life cycle assessment, *Journal of environmental management*, 91(1), 1-21.
- Geyer R, Jambeck J R, Law K L, 2017, Production use and fate of all plastics ever made, *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Ghabchi R, Dharmarathna C P, Mihandoust M, 2021, Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study, *Construction and Building Materials*, 292, 123377.
- Ghuzlan K A, Al-Khateeb G G, Qasem Y, 2013, Rheological properties of polyethylene-modified asphalt binder, *Athens Journal of Technology and Engineering*, 10, 1-14.

- Giustozzi F, Crispino M, Flintsch G, 2012, Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 409-419.
- Hınıslioğlu S, Açar E, 2004, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials letters*, 58(3-4), 267-271.
- Isacsson U, Zeng H, 1998, Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt, *Materials and Structures*, 31, 58-63.
- Jony H H, Al-Rubaie M F, Jahad I Y, 2011, The effect of using glass powder filler on hot asphalt concrete mixtures properties, *Eng. Technology Journal*, 29(1), 44-57.
- Kakar M R, Mikhailenko P, Piao Z, Bueno M, Poulikakos L, 2021, Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 280, 122492.
- Kalantar Z N, Karim M R, Mahrez A, 2012, A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, 33, 55-62.
- Karacasu M, Okur V, Er A, 2015, A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures, *The Scientific World Journal*, 2015(1), 258586.
- Karthikeyan M, Bindhu B, 2018, Comparative study on bituminous concrete modified by nano silica and micro silica, *International Journal of Science Technology ve Engineering*, 4(10), 53-57.
- Köfteci S, Gunay T, Ahmedzade P, 2020, Rheological analysis of modified bitumen by PVC based various recycled plastics, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(4), 04020063.
- Kök B V, Yılmaz M, Geçkil A, 2013, Evaluation of low-temperature and elastic properties of crumb rubber–and SBS-modified bitumen and mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2), 257-265.

- Kök E, 2008, Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 214, İstanbul.
- Kwame B, Baako A S Y, 2015, Assessment of suitability of plastic waste in bituminous pavement construction, *Assessment*, 7(11).
- Liu B, Li J, Han M, Zhang Z, Jiang X, 2020, Properties of polystyrene grafted activated waste rubber powder (PS-ARP) composite SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 238, 117737.
- Mallick R B, El-Korchi T, 2017, *Pavement Engineering: Principles and Practice*, 3rd ed., CRC Press, 775, Boca Raton.
- McLeod N W, 1989, Relationship of Paving Asphalt Temperature Susceptibility as Measured by PVN to Paving Asphalt Specifications, *Asphalt Paving Mixture Design and Asphalt Pavement Performance*, Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 410-489.
- Ming N C, Jaya R P, Awang H, Ing N L S, Hasan M R M, Al-Saffar Z H, 2022, Performance of glass powder as bitumen modifier in hot mix asphalt, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103263.
- Morrison G R, Lee J K, Hesp S A, 1994, Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification, *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 231-240.
- Mu Y, Ma F, Dai J, Li C, Fu Z, Yang T, Jia M, 2020, Investigation on high temperature rheological behaviors and fatigue performance of trans-polyoctenamer-activated crumb rubber modified asphalt binder, *Coatings*, 10(8), 771.
- Murana A, Akilu K, Olowosulu A, 2020, Use of expanded polystyrene from disposable food pack as a modifier for bitumen in hot mix asphalt, *Nigerian Journal of Technology*, 39(4), 1021-1028.
- Nizamuddin S, Boom Y J, Giustozzi F, 2021, Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review, *Polymers*, 13(19), 3242.

- Nouali M, Derriche Z, Ghorbel E, Chuanqiang L, 2020, Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements, *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1713-1725.
- Padhan R K, Sreeram A, Gupta A, 2020, Evaluation of trans-polyoctenamer and cross-linking agents on the performance of waste polystyrene modified asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 21(4), 1170-1182.
- Padhan R K, Sreeram A, Mohanta C S, 2021, Chemically recycled polyvinyl chloride as a bitumen modifier: Synthesis, characterisation and performance evaluation, *Road Materials and Pavement Design*, 22(3), 639-652.
- Plati C, 2019, Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review, *Construction and Building Materials*, 211, 539-555.
- Polacco G, Filippi S, Merusi F, Stastna G, 2015, A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility, *Advances in colloid and interface science*, 224, 72-112.
- Punith V, Veeraragavan A, 2003, Laboratory fatigue studies on bituminous concrete mixes utilizing waste shredded plastic modifier, Publication of: ARRB Transport Research, Limited.
- Rath P, Love J E, Buttlar W G, Reis H, 2019, Performance analysis of asphalt mixtures modified with ground tire rubber modifiers and recycled materials, *Sustainability*, 11(6), 1792.
- Saltan M, Öksüz B, Uz V E, 2015, Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt, *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(3), 271-277.
- Schroeder R L, 1994, The use of recycled materials in highway construction, *Public roads*, 58(2), 32-41.
- Sertakar G A, 2008, Demineralize Asfaltitten Karbon Köpük Üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101, İstanbul.

- Sengoz B, Isikyakar G, 2008, Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- Shafabakhsh G, Ani O J, Mirabdolazimi S, 2015, Experimental investigation on rutting performance of microsilica modified asphalt mixtures, *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 4, 371-378.
- Singh P, Tophel A, Swamy A K, 2017, Properties of asphalt binder and asphalt concrete containing waste polyethylene, *Petroleum Science and Technology*, 35(5), 495-500.
- Topal A, K k B V, Kaya D, Őeng z B, Dokandari P, Yılmaz M, 2018, Investigation of the properties of warm mix asphalt involving organic additive, *Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), 45-53.
- Toschi F, Sega M, 2019, *Flowing matter*, Springer Nature, 309.
- Umar F, Ağar E, 1991, *Yol  stnyapısı*, İT  inşaat Fakültesi Matbaası, 122-129.
- Uwanuakwa I D, Adamu M, Ali S I A, Akpınar P, Hasan M R M, Shariff K A, Umar I K, Haruna, S I, 2023, Effect of polymer molecular weight on the rheology of SBS polymer-modified asphalt binder, *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(3), 89.
- Victoria I, 2019, *Recycling and resource recovery infrastructure*, Australia
- Wu S, Montalvo L, 2021, Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review, *Journal of Cleaner Production*, 280, 124355.
- Xu F, Zhao Y, Li K, 2021, Using waste plastics as asphalt modifier: A review, *Materials*, 15(1), 110.
- Yılmaz M, K k B V, 2008, Determining the high temperature performance grade and workability of styrene-butadiene-styrene modified bituminous binders according to superpave system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23, 811-819.
- Y kn  K,  zt rk T, Komut M, 2021, *Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı*, UlaŐtırma ve Altyapı Bakanlığı,305, Ankara.

Zaumanis M, Mallick R B, Frank R, 2013, Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, Transportation Research Record, 2370, 17-25.

Zhang F, Yu J, 2010, The research for high-performance SBR compound modified asphalt, Construction and Building Materials, 24(3), 410-418.

Zhu H, Cai H, Yan J, Lu Y, 2014, Life cycle assessment on different types of asphalt rubber pavement in China, National Engineering Laboratory for Advanced Road Materials,2200.

İnternet Kaynakları

1-<http://www.erguven.net/anasayfa/yazigoster/Petrolden-Benzin-Elde-Edilmesi>,
23.12.2024

2-<https://www.sanalsantiye.com/ustyapi-projelendirmesinde-esneklik-modulunun-yeri/>,
23.12.2024

3- <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/beton-yollar/>, 25.12.2024

4-<https://showme.missouri.edu/2021/driving-innovation-to-help-eliminate-plastic-waste/>, 25.10.2024

5- <https://www.shutterstock.com/>, 27.10.2024

6- <https://www.shutterstock.com/>, 27.10.2024

7- <https://news.climate.columbia.edu/2020/03/13/fix-recycling-america/>, 20.10.2024