



**ATIK KUVARS KUMUNUN
BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İMAM ÇALIŞ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
AĞUSTOS - 2024**

**ATIK KUVARS KUMUNUN
BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İMAM ÇALIŞ

ORCID ID: 0009-0002-6200-5088

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Danışman

Dr. Öğr. Murat Vergi TACİROĞLU

ORCID ID: 0000-0002-0672-1672

**MERSİN
AĞUSTOS - 2024**

ÖZET

ATIK KUVARS KUMUNUN BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANIMI

Bitüm modifikasyonu, trafik yükleri ve atmosferik etkilere doğrudan maruz kalan esnek üstyapı kaplama tabakalarını daha dayanıklı hale getirmek için yapılan bir işlemdir. Modifikasyon işlemi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan saf bağlayıcıya bir katkı malzemesinin eklenip karıştırılmasıyla yapılmaktadır. Bitüm modifikatörü olarak genellikle ticari ürünler kullanılmaktadır. Ancak ticari amaçla üretilen katkıların belirli bir maliyeti vardır ve zaten yüksek olan karayolu yapım maliyetlerinin daha da artmasına yol açmaktadır. Son yıllarda, hem ticari bitüm modifikatörlerine alternatif olarak hem de sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla çeşitli tipte endüstriyel ve evsel atıkların bitüm modifikatörü olarak kullanımı ile ilgili çalışmaların sayısı hızla artmaktadır. Bu çalışmada Mersin ili çevresinde faaliyet gösteren cam fabrikalarından üretim kalıntısı olarak ortaya çıkan atık kuvars kumlarının bitüm modifikatörü olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaçla B50/70 dereceli saf bitüme ağırlıkça %1, %2 %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu eklenerek bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimler laboratuvar testleri ile gözlenmiştir. Çalışma kapsamında saf bitüm numunelerine ve modifiye bitüm numunelerine özgül ağırlık, yanma-parlama noktası, penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi, duktilite, dinamik kesme reometresi (DSR), kuvvet ölçümlü duktilite, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları floresan spektroskopisi (XRF), dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kırılgan eğilme reometresi (BBR), Nicholson soyulma ve Vialit yapışma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar B50/70 penetrasyonlu saf bitüme %3 oranında atık kuvars kumu eklenmesiyle yapılan modifikasyonun bağlayıcının özelliklerine olumlu katkıları olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Kuvars Kumu, Bitüm Modifikasyonu, Geri Dönüşüm, Bitüm Reolojisi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU, Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

ABSTRACT

USE OF WASTE QUARTZ SAND IN BIOMODIFICATION

Bitumen modification is a process to make flexible pavement layers more durable due to direct exposure to traffic loads and atmospheric influences. The modification process is performed by adding and mixing an additive to a pure binder heated to a certain temperature. Commercial products are generally used as bitumen modifiers. However, commercially produced additives have a certain cost and lead to an increase in the already high cost of highway construction. In recent years, the number of studies on the use of various types of industrial and household wastes as bitumen modifiers has been increasing rapidly, both as an alternative to commercial bitumen modifiers and to contribute to sustainability. In this study, the potential of using waste quartz sands from glass factories operating around Mersin province as bitumen modifier was investigated. For this purpose, 1%, 2%, 3% and 4% by weight of waste quartz sand were added to B50/70 grade pure bitumen and the changes in the physical and rheological properties of the binder were observed by laboratory tests. Within the scope of laboratory studies, specific gravity, burning flash point, penetration, softening point, storage stability, ductility, dynamic shear rheometer (DSR), force measured ductility, scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), rotational thin film heating (RTFOT), pressure aging vessel (PAV), beam bending rheometer (BBR), Nicholson peel and Vialit adhesion tests were performed on pure bitumen samples and modified bitumen samples. The test results showed that the modification of B50/70 penetration pure bitumen with the addition of 3% waste quartz sand has a favorable effect on the binder properties.

Keywords: Waste Quartz Sand, Bitumen Modification, Recycling, Bitumen Rheology

Supervisor: Assit. Prof. Dr. Murat Vergi TACIROĞLU, Department of Civil Engineering, Mersin University, Mersin.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim, öğretimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, tez çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen değerli Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen eşim Yağmur TEMUÇİN ÇALIŞ, kızım Defne Maya ÇALIŞ ve oğlum Barış Giray ÇALIŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde emeği olan 06.02.2023 tarihli Kahramanmaraş Pazarcık depreminde Adıyaman'da kaybettiğim Annem Fatma ÇALIŞ'a minnettarım.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca imkanlar sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığına, Karayolları 1. Bölge (İstanbul) Müdürlüğüne ve Karayolları 5. Bölge (Mersin) Müdürlüğüne teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	5
2.1. Bitüm Modifikasyonu ile İlgili Çalışmalar	6
2.2. Atık Malzemelerin Filler Olarak Asfalt Karışımında Kullanımı	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM	19
3.1. Materyal	19
3.1.1. B50/70 Penetrasyonlu Bitüm	19
3.1.2. Atık Kuvars Kumu	19
3.2. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması	20
3.3. Yöntem	21
3.3.1. X- Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF)	22
3.4. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler	23
3.4.1. Özgül Ağırlık Tayini Deneyi	23
3.4.2. Yanma-Parlama Noktası Deneyi	24
3.4.3. Penetrasyon Deneyi	25
3.4.4. Yumuşama Noktası Deneyi	26
3.4.5. Depolama Stabilitesi Deneyi	27
3.4.6. Düktilite Deneyi	28
3.4.7. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi	29
3.4.8. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi	30
3.4.9. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi	31
3.4.10. BBR (Kiriş Eğilme Reometresi) Deneyi	32
3.4.11. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi	33
3.4.12. Penetrasyon İndeksi (PI)	33
3.4.13. Nicholson Soyulma Deneyi	34
3.4.14. Vialit Yöntemi ile Yapışma Deneyi	35
3.4.15 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	36
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	37
4.1. X- Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF)	37
4.2. Özgül Ağırlık Tayini Deneyi	38
4.3. Yanma- Parlama Noktası Deneyi	38
4.4. Penetrasyon Deneyi	39
4.5. Yumuşama Noktası Deneyi	40
4.6. Depolama Stabilitesi Deneyi	41
4.7. Düktilite Deneyi	42
4.8. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi	43
4.9. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi	44
4.10. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Dinamik Kesme (DSR) Deneyi Sonuçları	46
4.11. PAV Deneyi Sonrası Yapılan Dinamik Kesme (DSR) Deneyi Sonuçları	48
4.12. Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deneyi	50
4.13. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi	52
4.14. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Penetrasyon Deneyi Sonuçları	53

	Sayfa
4.15. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	54
4.16. Penetrasyon İndeksi (PI)	54
4.17. Nicholson Soyulma Deneyi	55
4.18. Vialit Yöntemi ile Yapışma Deneyi	56
4.19. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	57
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71



TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. 50/70 Penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri	33
Tablo 2. X-Işınları floresan spektroskopisi (XRF) analizi	53



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Karayolları genel müdürlüğü (KGM) yol satıh durumu (01.01.2024)	1
Şekil 2.1. Asfaltın zaman sıcaklığına göre davranışı (Şehnaz Tıraş, 2023)	5
Şekil 2.2. Superpave performans sınıfı gösterimi (Yüknü, Öztürk, & Komut, 2021)	6
Şekil 3.1. Atık kuvars kumu	20
Şekil 3.2. Bitüm ile atık kuvars kumu karıştırıcısı ve numune kapları	21
Şekil 3.3. Deneysel çalışmaya ait akış şeması	22
Şekil 3.4. a) Karakteristik X-ışını emisyonu, b) Auger elektron emisyonu (Güzelçiçek, 2019)	23
Şekil 3.5. Özgül ağırlık deney beheri	24
Şekil 3.6. Parlama-yanma noktası deneyi cihazı	25
Şekil 3.7. Penetrasyon deneyi cihazı	26
Şekil 3.8. Yumuşama noktası deneyi	27
Şekil 3.9. Depolama stabilitesi numuneleri	28
Şekil 3.10. Düktilite numuneleri	29
Şekil 3.11. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi cihazı	30
Şekil 3.12. RTFOT deney numuneleri	31
Şekil 3.13. PAV sonrası numuneler	32
Şekil 3.14. BBR numune kalıpları	33
Şekil 3.15. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi	34
Şekil 3.16. Nicholson soyulma deney numuneleri	35
Şekil 3.17. Vialit yöntemi deney numuneleri	36
Şekil 4.1. Özgül ağırlık deney sonuçları	38
Şekil 4.2. Yanma-parlama noktası deney sonuçları	39
Şekil 4.3. Penetrasyon deney sonuçları	39
Şekil 4.4. Yumuşama noktası deney sonuçları	40
Şekil 4.5. Depolama sonrası kalıcı yumuşama noktası sonuçları	41
Şekil 4.6. Depolama sonrası kalıcı penetrasyon sonuçları	42
Şekil 4.7. Düktilite deney sonuçları	43
Şekil 4.8. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları	44
Şekil 4.9. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi $G^*/\sin\delta$, Pa parametresinin değişimi	45
Şekil 4.10. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi G^* (Pa) parametresinin değişimi	45
Şekil 4.11. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi δ ($^{\circ}$) parametresinin değişimi	46
Şekil 4.12. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası $G^*/\sin\delta$, Pa	47
Şekil 4.13. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası G^* (Pa)	47
Şekil 4.14. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası δ ($^{\circ}$)	48
Şekil 4.15. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası $G^*/\sin(\delta)$ parametresinin değişimi	49
Şekil 4.16. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası G^* (Pa) parametresinin değişimi	49
Şekil 4.17. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası δ ($^{\circ}$) parametresinin değişimi	50
Şekil 4.18. BBR deneyinden elde edilen sünme sertliği sonuçları	51
Şekil 4.19. BBR deneyinden elde edilen sünme oranı değerleri	52
Şekil 4.20. Kuvvet ölçümlü düktilite deney sonuçları	53
Şekil 4.21. RTFOT deneyi sonrasında yapılan penetrasyon deneyi sonuçları	53
Şekil 4.22. RTFOT deneyi sonrasında yapılan yumuşama noktası deney sonuçları	54
Şekil 4.23. Penetrasyon indeksi sonuçları	55
Şekil 4.24. Nicholson soyulma deney sonuçları	56
Şekil 4.25. Vialit yöntemi ile yapışma deneyi sonuçları	57
Şekil 4.26. Atık kuvars kumunun SEM cihazında görüntüsü	58
Şekil 4.27. %0 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü	59

	Sayfa
Şekil 4.28. %1 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü	60
Şekil 4.29. %2 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü	60
Şekil 4.30. %3 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü	60
Şekil 4.31. %4 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü	61



SİMGELER VE KISALTMALAR

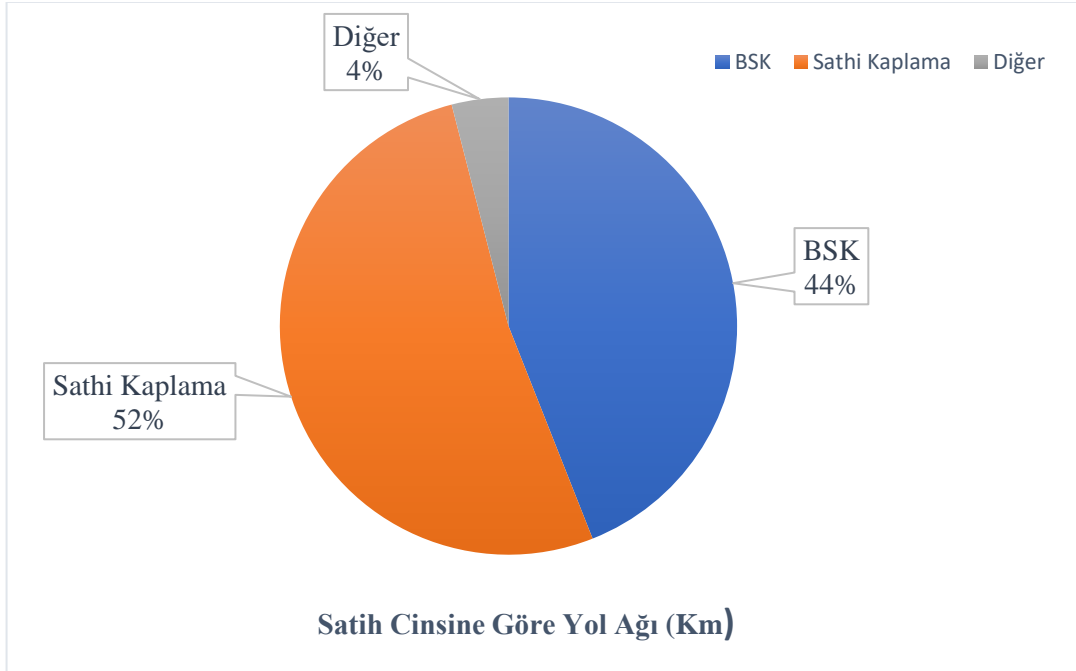
Simge	Tanım
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
BaO	Baryum Oksit
CaO	Kalsiyum oksit
Cl	Klor
Cr ₂ O ₃	Krom Oksit
F	Flor
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
MnO	Mangan Oksit
MPa	Megapascal
Na ₂ O	Sodyum Oksit
Nano-CaCO ₃	Nano kalsiyum karbonat
Nano-TiO ₂	Nano titanyum dioksit
Nb ₂ O ₅	Niobyum pentoksit
NiO	Nikel oksit
P ₂ O ₅	Fosfor Pentoksit
PbO	Kurşun Oksit
Rb ₂ O	Rubidium oksit
SiO ₂	Silikon Dioksit
SO ₃	Kükürt trioksit
SrO	Stronsiyumoksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
Y ₂ O ₃	İtriyum Oksit
ZnO	Çinko Oksit
ZrO ₂	Zirkonyum Oksit

Kısaltma	Tanım
A.Z.	Ateş Zaiyatı
AASHTO	Amerikan Karayolları Birliği
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
CR	Kauçuk Kırıntısı
DSR	Dinamik kesme reometresi
DTG	Türev termogravimetri
EVA	Etilen vinil asetat
EVA-g-MAH	Etilen vinil asetat aşılınmış maleik anhidrit
FTIR	Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi
HMA	Sıcak asfalt karışım
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi
Pa	Pascal
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi
Pen ₂₅	25 °C'de Penetrasyon Değeri
PG	Performans Sınıfı
PI	Penetrasyon İndeksi
PMB	Polimer modifiye bitüm
PPA	Polifosforik Asit
PVC	Polivinil klorür
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
SBR	Styrene butadiene rubber
SBS	Stiren-Bütadien-Stiren
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SHRP	Stratejik Karayolu Araştırma Programı
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama Bağlayıcı Şartnamesi
TG	Termogravimetri
TG/DTA	Diferansiyel termal analiz
TMA	Taş mastik asfalt
TS	İndirekt Çekme Deneyi
UÇ	Uçucu kül
UTM	Esnek modül
Vfa	Asfaltla dolu boşluk yüzde oranı
Vh	Boşluk yüzde oranı
VMA	Agregalara arası boşluk yüzde oranı
WCO	Atık yemeklik yağ
XRF	X-Işınları Floresan Spektroskopisi

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde en fazla tercih edilen kara ulaştırma sistemi karayoludur. Uluslararası ve şehirlerarası yük/yolcu taşımacılığında en fazla pay karayolu taşımacılığına aittir ve bu pay sürekli olarak artmaktadır. Şehir içi karayolu taşımacılığının etkinliği diğer yollara göre daha fazladır. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren artan ticari faaliyetler nedeniyle dünya genelinde karayolları daha konforlu, hızlı ve ekonomik açıdan daha uygun olması gibi avantajları nedeniyle demiryolu, denizyolu ve havayoluna göre daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Karayolu taşımacılığının diğer ulaşım türlerine nazaran aktarmasız olması da önemli bir etken olarak görülmektedir (Yayla, 2015). Nüfus artışına bağlı olarak motorlu taşıtlara olan ihtiyacın da artması ile karayollarındaki trafik hacmi ve buna bağlı olarak araç dingil yükleri artmıştır. Planlamanın üzerindeki artan trafik hacmi, karayollarının servis ömrünün tamamlamadan bakım onarıma ihtiyaç duymasına neden olmaktadır (Şehnaz Tıraş, 2023).

Karayolu ulaşım altyapısının imalatı ve bakım/onarım çalışmaları büyük maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre Ülkemiz 2024 yılı merkezi yönetim bütçesinden karayolları için %2,40 oranında ödenek ayrılmıştır (www.kgm.gov.tr). Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki karayollarının toplam uzunluğu 01.01.2024 tarihi itibarıyla 68.654 Km'dir. Bu yolların 29.879 Km.'si asfalt beton kaplamalı (bitümlü sıcak karışım) yollar oluşmakta ve karayolları yol ağındaki yolların yaklaşık %44'ünü oluşturmaktadır (Şekil.1). (www.kgm.gov.tr).



Şekil 1.1. Karayolları genel müdürlüğü (KGM) yol satih durumu (01.01.2024)

Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi Ülkemizde var olan karayolu ağının çok büyük bir kısmı (%96) esnek üstyapı türleri olan BSK ve sathi kaplamalı yollar oluşturmaktadır.

Esnek üstyapılar taban zemini üzerine inşa edilen ve genellikle kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan yol yapılarıdır. Esnek üstyapılarda, kaplama tabakası trafik yükleri ile ilk temas eden tabakadır ve üzerine gelen yükleri alt tabakalara iletir. Temel ve alt temel tabakaları ise kaplamadan gelen yüklerin etkilerini azaltarak taban zeminine iletirler. Alt tabakalar üst tabakalara nazaran iri gradasyona sahip agregalardan oluşur ve bu nedenle su geçirgenliği daha fazladır. Kaplama tabakası ise karayolu taşıtları için güvenli ve konforlu seyahat imkanı sağlayacak şekilde su geçirimsiz, deformasyona karşı daha dirençli, ince gradasyona sahip agregalar kullanılarak inşa edilir. (Kaçaroğlu & Saltan, 2019).

Esnek üstyapılarda kullanılan bitümlü sıcak karışımlar, iri agrega, ince agrega ve mineral fillerden oluşan agrega karışımının bitümlü bağlayıcı ile kontrollü sıcaklık ve nem koşulları altında karıştırılmasıyla imal edilmektedir. Bitüm, ham petrolün rafine edilmesi sonucu elde edilen bir bağlayıcıdır. Avrupa'da bitüm terimi daha çok kullanılırken, Kuzey Amerika'da asfalt çimentosu veya asfalt bağlayıcı terimi tercih edilmektedir. Bitüm, esneklik özelliği, termoplastik bir malzeme olması, dayanıklı olması, yapışma yeteneğinin fazla olması ve geçirimsizlik özelliği nedeniyle esnek üstyapılarda bağlayıcı olarak tercih edilmektedir. Oda sıcaklığında genellikle yarı katı veya katı halde olan bitümlü bağlayıcılar doğrudan ısıtılarak veya ısıtıldıktan sonra içerisine su ve solvent eklenerek emülsifiye edilip akışkan hale getirilmektedir (Yüknü, Öztürk, & Komut, 2021).

Karayolunun en çok tercih edilen ulaşım türü olması nedeniyle esnek üstyapıların proje aşamasında belirlenen servis ömrünü zamanında tamamlaması ekonomik açıdan gereklidir. Artan trafik yükleri altında daha dayanıklı karayolu kaplamaları üretmek için yapılan işlemlerden biri de bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesidir. Bitüm modifikasyonu genellikle belirli bir sıcaklıkta bağlayıcıya bir katkı malzemesi eklenmesi ile yapılır. Modifiye edilen bitümlerin, kaplamaların tekerlek izi deformasyonuna karşı dayanımının artırması, agrega ve bitüm arasındaki yapışmanın artması, bitümlü karışımın yaşlanmasının gecikmesi, iklim koşulları altında oluşan sıcaklık farklılıklarına karşı duyarlılığının azalması, kaplamanın direncinin artması, esnekliğinin stabil kalması, karışım mukavemetinin yükselmesi vb. olumlu avantajları bulunmaktadır (Şehnaz Tıraş, 2023). Bitüm modifikasyonu genellikle bu iş için üretilmiş patentli katkı malzemeleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu nedenle sıklıkla kullanılan bitüm modifikatörlerinin belirli bir maliyeti vardır. Hali hazırda yüksek olan karayolu yapım maliyetlerine bitüm modifikatörleri de ilave maliyet getirmektedir.

İnsan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan, canlıların sağlığına zarar vererek yaşam alanlarını işgal eden tüm malzemeler atık olarak ifade edilmektedir. Atıkların buldukları ortamda azaltılması, kendi içinde uygun bir şekilde ayrıştırılması, toplanması, depolanması ve bunların sonucunda tekrardan geri kazanılması atık yönetimi olarak ifade edilmektedir. (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı) (Öz Kıcı & Saltan, 2020). Günümüzde çevresel kirlenmenin ve küresel ısınmanın arttığı bir dünyada atık yönetimi ciddi önem arz etmektedir. Sürdürülebilirliğin öneminin daha iyi anlaşıldığı

günümüzde atık malzemelerin bertaraf edilmesi veya geri dönüştürülmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Endüstriyel atıkların geri dönüşüm yöntemlerinden biri de inşaat endüstrisinde kullanımıdır. Atıkların inşaat malzemesi olarak kullanımı çevreye olumlu etkilerinin yanında yapım için gerekli olan esas malzemeye ihtiyacı azaltarak inşaat maliyetlerini de azaltmaktadır.

İnşaat endüstrisinde atık malzemelerin kullanımı kırmataş agrega gibi doğal inşaat malzemelerine olan talebi azaltarak dolaylı yoldan çevrenin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Böylece aynı zamanda tasarruf da sağlanmaktadır. İnşaat endüstrisinde kullanılan atık malzemeler yıkıntı artıkları, yüksek fırınlarda ortaya çıkan yakma kalıntıları, kullanılmış lastikler, kullanılmış plastikler, kullanılmış camlar gibi endüstriyel ve evsel atıkları içeren geniş bir yelpazeye yayılmıştır (François & Jullien, 2009).

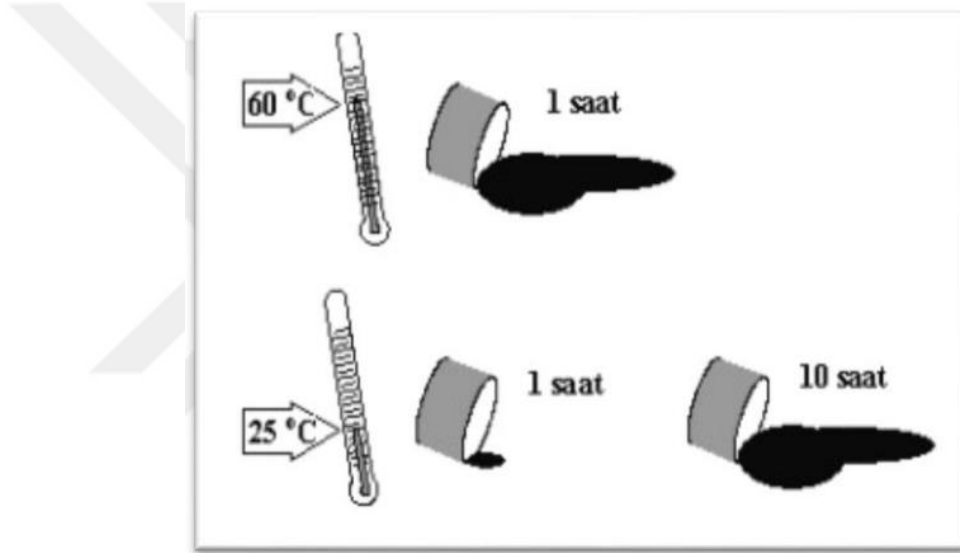
İnşaat işlerinde atıkların kullanıldığı işlemlerden biri de bitüm modifikasyonudur. Bu tez çalışmasında Mersin ili ve çevresinde faaliyet gösteren cam fabrikalarında üretim sonrası ortaya çıkan atık kuvars kumunun bitüm modifikatörü olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Ülkemizdeki karayolları genellikle esnek üstyapılı olarak tasarlanmaktadır. Esnek üstyapıların imalatında yolun yapılacağı bölgenin iklim koşulları dikkate alınmaktadır. Esnek üstyapı tasarlanırken asfalt çimentosunun tipine, kullanılacak agreganın ince/kaba/filler oranlarına ve kullanılacak katkı malzemesinin oranına karar verilir (Yayla, 2015).

Türkiye’de esnek üstyapılarda kullanılan dizayn rehberinde bitüm penetrasyon değerine bağlı olarak sınıflandırma tablosu bulunmaktadır. Bitümün penetrasyonu tayini 25°C’de yapılmaktadır. 25°C’de penetrasyon değerleri aynı olan bitümler, sıcaklıklara bağlı olarak Şekil 2.1.’de de görüldüğü üzere farklı davranışlar gösterebilmektedir. Bitümün maruz bırakıldığı yüklenme hızı da bağlayıcının davranışına etki etmektedir (Şehnaz Tıraş, 2023).



Şekil 2.1. Asfaltın zaman sıcaklığına göre davranışı (Şehnaz Tıraş, 2023)

Bitüm işlenebilirlik sıcaklığına yaklaştığında agrega yüzeyinin tamamını kaplayıp boşluk oranı minimum düzeye indiren yapı oluştururken soğumaya bırakıldığında sıcaklığa bağlı olarak viskoelastik bir davranış sergilemektedir.

Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) 1987 yılında bitümün fiziksel davranış özelliklerinin incelenmesi amacıyla mevcut deneylerin geliştirilmesi ve pek çok yeni deney ekipmanını kapsayan Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) Bağlayıcı Şartnamesini hazırlanmıştır. Hazırlanan şartname AASHTO ve ASTM standartlarına bağlıdır (Şehnaz Tıraş, 2023)..

SUPERPAVE tasarım yönteminde farklı sıcaklıklarda asfaltların davranış performansına göre sınıflandırma yapılmıştır. Yapılan sınıflandırmada “Performans Sınıfı (Performance Grade) PG simgesi ile Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Yüknu, Öztürk, & Komut, 2021).



Şekil 2.2. Superpave performans sınıfı gösterimi (Yüknü, Öztürk, & Komut, 2021)

Şekil 2.2’de verilen örnekte Superpave şartnamesine göre performans sınıfının gösterimi verilmiştir. Burada PG 64-22 kodlamasında verilen 64 sayısı bağlayıcının özelliklerini kaybetmeden hizmet vereceği maksimum sıcaklığı, -22 ise minimum sıcaklığı ifade etmektedir (Yüknü, Öztürk, & Komut, 2021).

Yol yapım çalışmalarında ticari ürünler bitüm ile modifiye edilmektedir. Ancak ticari ürünlerin (stiren butadien lastik (SBS) ve styrene butadiene rubber (SBR)) belirli bir maliyeti olması maliyetli olması nedeniyle araştırmacılar alternatif malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmalarda kullanılan malzemeler atık yağlar, çeşitli faaliyetler sonucu ortaya çıkan küller, atık lastikler vb. olarak sıralanabilir (Şehnaz Tıraş, 2023).

Yapılan literatür taraması iki alt başlık altında ele alınmıştır. İlk alt başlıkta bitüm modifikasyonu ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. İkinci alt başlıkta ise atık malzemelerin asfalt karışımında kullanımı ile ilgili araştırmalara yer verilmiştir.

2.1. Bitüm Modifikasyonu ile İlgili Çalışmalar

Jew vd. (1986) yaptıkları çalışmada, dağıtılmış polietilen içeren bitümün düşük sıcaklıklarda (-40 ve 0 °C) gerilme-şekil değiştirme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada farklı sıcaklıklarda polietilen, ısıtılmış bitüm içerisine dağıtılarak polietilenin koloidal süspansiyonları elde edilmiştir. Dağıtılan süspansiyonların viskoziteleri, her polietilen sınıfı için farklı sıcaklıklarda ve konsantrasyonlarda belirlenmiştir. Polietilenlerin moleküler ağırlıklarında ve kristalliğinde büyük farklılıklar olmasına rağmen, aynı konsantrasyonların viskozite farklılıklarının nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir. Viskozite polietilen konsantrasyonuna karşı hassas olduğu ve karışımın ağırlıkça %10’dan daha büyük konsantrasyonlarda işlenmesi zorlaşmıştır. Ağırlıkça %8’lik optimum polietilen konsantrasyon bitümlü karışım -30°C’ye yakın sıcaklıklarda artan eğilme mukavemetine, artan eğilme modülüne ve uzamaya ile kırılma enerjisinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. -20 °C’de B80/100 bitüme

kıyasla kırılma enerjisinde dokuz kat artış göstermiştir. Karışım tasarımı sonuçları için tipik bir agrega seçilmiş ve Ontario'da daha fazla kullanılan MTC HL4 sıcak karışım formülü ile karşılaştırılmıştır. Polietilen ile modifiye edilen asfalt beton karışımı Marshall deneyinde kararlılık sonuçlarında birbirinden farklı oranlarda artışlar göstermiştir. 0°C üzerindeki sıcaklıklarda esneklik modülünde artışlar olmuştur. Polietilen bulunan Marshall briketleri suya uzun süre daldırıldıktan sonra daha fazla ıslak mukavemete sahip olmuştur. Bu tespitler ile Avusturya'da geliştirilen ticari ürün olan Novophalt kaplama malzemeleri için yayınlanan bilgiler ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Asfalt sıcak karışım kaplama malzemelerinde polietilen kullanımının yüksek ve düşük sıcaklıklarda sıcaklık değişkenliğinin genişlediği, bu amaçla kaplama bozulmalarında ve düşük sıcaklıklarda çatlamayı azaltabileceği, kaplama ömrünün iki kattan daha fazla artış gösterebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Modifikasyonun maliyeti ile ilgili saf polietilen yerine hurda veya geri kazanılmış polietilen kullanılması ile daha az maliyetli olacağı öngörülmüştür.

Mouillet vd. (2008) yaptıkları çalışmada, Polimer modifiyeli Bitümlerin (PMB'ler) orijinal olarak karıştırılmasıyla uzun (PAV) ve kısa (RTFOT) dönem yaşlanmayı test etmişlerdir. PMB'lerin plastomer ve elastomerler içerdiği, içeren malzemelerin bazılarının çapraz bağlı olduğu, her faz için polimer oranları ve bitümü karakterize eden aromatiklik, alifatiklik ve yoğunlaşma gibi fonksiyonel endekslerin belirlenmesi ve ayrıca PMB'deki polimer dağılımını haritalandırmak için kızılötesi mikroskop kullanılmıştır. PMB'lerin orijinal hallerinde karakteristik yapıları, hangi polimer türünün şişme gösterdiği, doğal yapısının nasıl değiştirildiği incelenmiştir. Aynı PMB'lerin uzun ve kısa dönem (PAV+ RTFOT) yaşlanmasından sonra karakteristik yapılarında şişmeden sonra yaşlanmalarının nasıl gerçekleştiği tespit edilmiştir. IR mikroskopu ile kinetik çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel yaşlanma testleriyle elde edilen eğilimler incelenmiştir. Bu çalışmalar, bir PMB'deki farklı oranlardaki yaşlanmaların ve kimyasal bağlamda birbirlerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. PMB'de yaşlanma sonucunda mikro-morfolojik özellikleri açığa çıkmıştır. Çapraz bağlamanın PMB mikro yapısı yaşlanma üzerinde etkisi daha iyi anlaşılmıştır.

Çubuk vd. (2009) yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda epoksi saf (B50/70) penetrasyona sahip bitüme ilave edilerek modifiye bitümün viskozitesi değişimini incelemişlerdir. Epoksi ile modifiye edilen bitüme, penetrasyon, yumuşama noktası, DSR (dinamik kesme reometresi), DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre), RTFOT (yuvarlanan ince film fırın testi), PAV (basınçlı yaşlandırma kabı), BBR (bükme kirişi) testleri uygulanmıştır. Ayrıca saf bitüm ve epoksiyle modifiye edilen bitüme agrega karışımları ile yapışma, stabilite, Nicholson soyulma ve Marshall testleri yapılarak saf bitüm ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda reolojik ve performans özelliklerine göre optimum dozaj %2 olarak bulunmuştur. Epoksinin bitüme modifiye edilmesi ile tekerlek izi oluşumu, soyulma ve çatlamada gözle görülür azalma olacağını değerlendirilmiştir.

Keyf (2010) yaptığı çalışmada, B50/70 penetrasyonlu saf bitüme heteropolimer (SBS) ve reaktif terpolimer (Elvaloy RET) katkı maddesi ekleyerek modifiye bitüm elde edilmeye çalışmıştır. Saf bitüme heteropolimer (SBS) ve reaktif terpolimer (Elvaloy RET) katkı malzemesi ekleyerek penetrasyon

deneyleri yapılmıştır. Modifiye bitüm saf bitümlü bağlayıcıya göre penetrasyon değerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Penetrasyon değerindeki azalmanın saf bitüme ilave edilen SBS (Kraton D1101)'den ve oksijenden kaynaklı bitümün sertleşmesinde etkin rol oynayan (Elvaloy RET)'den kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Penetrasyon indeksinde başlangıçtan itibaren 2 saat içerisinde SBS'in eritilmesi sonucunda artış olduğu, ayrıca Elvaloy RET'in eklenmesiyle oluşan tepkime sonucunda da penetrasyon indeksinde artış olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada Elvaloy RET ile SBS ile modifiye edilen B50/70 penetrasyonlu saf bitümün penetrasyon değerlerinde azalma, penetrasyon indeksi değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlarla modifiye bitümün sıcaklığa karşı dayanımının arttığı, sahada kullanımının uzun ömürlü olacağı tespit edilmiştir.

Luo ve Chen (2010) yaptıkları çalışmada, etilen vinil asetat (EVA) ve etilen vinil asetat aşılınmış maleik anhidrit (EVA-g-MAH) kopolimerleri içeren modifiye bitümün özelliklerini araştırmışlardır. Saf bitüme farklı polimerler ve farklı oranlarda eklenmesiyle, yumuşama noktası sonuçlarında, yüksek sıcaklıklarda depolama kararlılığı, düşük sıcaklıklarda süneklik vb. özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir. Polimer modifiye bitümler (PMB'ler) termogravimetri (TG), türev termogravimetri (DTG) ve fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile analizleri yapılmıştır. Numunelerin karakteristiklerinin kararlılıklarında az miktarda artış gösterdiği, en yüksek kararlılığa sahip numunelerin EVA-g-MAH PMB'lerin olduğu tespit edilmiştir. Dinamik kesme reometresi (DSR) testleri, saf bitüme eklenen EVA-g-MAH katkı malzemesinin bağlayıcının reolojik özellikleri üzerinde büyük bir miktarda etkisinin olduğu, EVA-g-MAH modifiye edilen PMB numunelerinin daha az sıcaklık duyarlılığı gösterdiği ve düşük sıcaklıkta kalıcı deformasyona ve çatlamaya karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Taşçı (2010) yaptığı çalışmada, atık lastiklerin parçalanması sonucunda ortaya çıkan atık yağ ve karbon siyahı ile saf bitümü modifiye etmiştir. Modifiye edilen atığın reolojik özellikleri incelenmiştir. Reolojik özellikleri, dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), kiriş eğilme reometresi deneyi (BBR) penetrasyon ve Marshall deneyi ile değerlendirilmiştir. Modifiye bitüme yapılan deneyler sonucunda saf bitüme göre modifiye bitümün özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir. Modifiye bitümün yumuşama noktası değerlerinde azalma, penetrasyon değerlerinde artış meydana gelmiştir. Saf bitüm eklenen lastik yağı ile bitümün yaşlanması azalmıştır. Modifiye bitüm ile bitümün penetrasyon sınıfında (PG 64-22'den PG 58-28'e) değişim meydana gelmiştir. Yapılan Marshall deneyi ile numunenin stabilitesinde azalma meydana gelmiştir. %4 oranında ilave edilen numunede akma değerinde azalma görülmüştür. Bu sonuçla numunenin plastik deformasyonlara daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Akma değerindeki azalma meydana gelmesine rağmen şartname değerindeki limitler dahilinde olduğu ve malzemenin daha gevrek olacağı değerlendirilmiştir.

Demir (2011) yaptığı çalışmada, B50/70 penetrasyonlu Tüpraş saf bitümü ile DUPONT firmasının stiren bütadien stiren (SBS), reaktif elastomerik terpolimer (Elvaloy RET) ve etilen vinil asetat (EVA) polimerleri ile modifiye etmiştir. Yapılan modifikasyon ile bitüm karışımından farklı

zamanlarda numuneler alınmıştır. Alınan her adet numuneye penetrasyon, elastik geri dönme, düktilite ve yumuşama noktası testleri yapılmıştır. Saf bitüm %1 SBS, %2 Elvaloy RET ve %1 EVA ile modifiye edilen numunelere IR spektrumu (FT-IR) ve termogravimetrik analiz/diferansiyel termal analiz (TG/DTA) testleri uygulanmıştır. Modifikasyon numunenin düktilite ve penetrasyon değerlerinde azalma, elastik geri dönme ve yumuşama noktası sonuçlarında artış olduğu tespit edilmiştir.

Motlag vd. (2012), yaptıkları çalışmada karbon nanotüpleri bitüm içerisinde bir katkı maddesi olarak kullanılıp bitüm ve asfalt karışımlarının teknik özelliklerindeki değişimleri araştırmışlardır. Nanotüp içeren tüplerin bitüm ile iyi bir karışım sonucunda homojen bir yapıda olması gerekmektedir. Çalışmada, modifiye bitümün geçirgenlik derecesi, yumuşama noktası, parlama noktası, süneklik, marshall stabilitesi, marshall akışı, marshall oranı (stabilite/akış) ve asfalt özgül ağırlığı vb. testler yapılmıştır. Nanotüp miktarının artması ile numunenin teknik özelliklerinin daha fazla iyi olacağı değerlendirilmiştir. Maliyet olarak prototipten daha yüksek olsa da toplam maliyette önemli bir oranda tasarruf sağlayabilmektedir. Ancak ilk başlangıçtaki maliyeti nedeniyle bu numunenin havaalanı vb. yapılar gibi ekonomik konularının öneminin az olduğu, kalitenin daha fazla ön planda olduğu yerlerde kullanılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu ürünün kullanılması ile asfalt kapamalarının iyileştirilmesinin yanı sıra alt kaplamalarda kalınlığını azaltacak ve alt tabakalarda kullanılan taş malzeme miktarını azaltacağı değerlendirilmiştir.

Köfteci vd. (2014), yaptıkları çalışmada saf bitüm ile polivinil klorür (PVC) bazlı üç grup atık plastiğin (pencere, panjur ve kablo atıkları) modifikasyonu incelemişlerdir. Saf bitüm ile modifiye edilmiş %1, %3 ve %5 oranlarındaki numunelere Superpave performans derecelerine (PG) göre uygun deneyler yapılmıştır. Çalışmada konvansiyonel testler, dönel viskozite (RV), dinamik kesme reometresi (DSR) ve eğilme kirişi reometresi (BBR) testleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarında %1 ile %3 oranları arasında PVC panjur ve pencere atığı ilave edilmesi ile modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki performansını arttırdığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Yüksek sıcaklıklarda performansı artırmaya rağmen düşük sıcaklıklarda modifiye bitümden etkilenmemiştir. Kablo atıkları ile modifiye edilen bitümlerden ağırlıkça %5 oranında atık içeren numunenin düşük sıcaklıklarda performansı artmıştır. Bu çalışmada tüm deney sonuçları incelendiğinde atık plastiklerden olan pencere atığının %3 oranında bitüm modifikatörü olarak kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sienkiewicz vd. (2017) yaptıkları çalışmada, kauçuk modifiyeli bitümün yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesinin iyileştirmesine yönelik araştırma yapmışlardır. Kauçuk modifiyeli bitümün depolama kararlılığı, modifikasyon içerisindeki bileşenlere malzeme ilave edilerek iyileştirilebilir. Kauçukla modifiye edilen bitüm, modifiye edilmeyen saf asfalt ile karşılaştırıldığında, özellikle artan esneklik, aşınma direnci, düşük sıcaklıklarda tekerlek izi direnci, çatlama direnci ve lastiklerin yol yüzeyi ile teması sırasında gürültüyü azaltma yeteneklerinin arttığı ortaya çıkarmıştır. Ancak polimer ile modifiye edilen asfaltın yaşlanmaya karşı direncinin düşük olduğu, zayıf fiziksel etkileşim olduğu ve asfalt ile polimer modifiye ediciler arasında kimyasal etkilenme olmaması ile polimer modifiye edilen

bitümler yüksek sıcaklıklarda (140°C–180°C) daha az depolama kararlılığına sahip olduğu ortaya çıkarmıştır.

Jahanian vd. (2017) yaptıkları çalışmada saf bitüm(B60/70) numunesine ağırlıkça %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında gilsonit ilave edilerek modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Saf bitüm B(60/70) ile ağırlık oranlarına göre modifiye edilen numuneler Marshall stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti ve nem duyarlılığının yanı sıra dinamik sünme ve esnek modül üzerindeki etkileri UTM cihazı ile değerlendirilmiştir. Saf bitüme gilsonit ilave edilmesi ile Marshall stabilitesi ve esnek modül parametresini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Dinamik sünme testinden elde edilen akış sayısının artması ile tekerlek izi direncinin arttığı görülmüştür.

Demirkaya & Terzi (2017) yaptıkları çalışmada katkı malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan SBS bazlı bir polimer seçmişlerdir. Seçilen bu katkı malzemesinin optimum kullanım oranın belirlenmesi amaçlanmıştır. Saf bitüme ağırlıkça %2, %3, %4, %5 ve %6 oranlarında SBS bazlı polimer eklenerek beş adet farklı malzeme modifiye bitüm numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen bu numuneler ile saf bitüme penetrasyon, ince film halinde ısıtma, yumuşama noktası, ince film halinde ısıtma sonrası penetrasyon, ince film halinde ısıtma sonrası yumuşama noktası ve depolama stabilitesi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda 54 adet Marshall briketi üretilmiştir. Bu briketlerin üçte birini kısa dönem yaşlandırılmış (RTOFOT) ile üçte biri ise uzun dönem (PAV) ile yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma deneyi sonrasında bütün numunelere indirekt çekme gerilmesi deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonuçları ile katkı malzemesinin bitüm üzerinde oluşan etkileri araştırılmıştır.

Rasman vd. (2018) yaptıkları çalışmada biyo-yağ, özellikle atık yemeklik yağın (WCO) bitüm modifikasyonunda kullanımını araştırmışlardır. Saf bitüm (B80/100) ile WCO modifiye edilen yağın fiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla penetrasyon, viskozite, yumuşama noktası, ısıtma kaybı ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri yapılmıştır. Çalışmada B(80/100) penetrasyon bitüm ile ağırlıkça %1, %2 ve %3'ü oranlarında yemeklik yağ (WCO) modifiye edilmiştir. Deney sonuçlarında saf bitüme göre yemeklik yağın (WCO) bitümü yumuşatarak dolayısıyla sıcaklıklarda duyarlılığının arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ağırlıkça %2 oranında olan yemeklik yağ (WCO) ilavesi sonrasında tekerlek izi direnci açısından saf bitüm ile karşılaştırılmış ve PG 64 performans derecesine sahip modifiye bitüm olduğu tespit edilmiştir.

Yıldırım vd. (2018) yaptıkları çalışmada, saf bitümü atık lastik ve cam lifleri modifiye etmişler ve modifiye bitümün asfalt betonunun performansına etkisini araştırmışlardır. Marshall tasarım yöntemi ile numuneler elde edilmiş ve sonuçlar üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Deney sonuçları incelenmiş ve Marshall dayanımlarında az miktarda bir azalış olduğu ancak tüm numunelerin gerekli standart koşullarını sağladığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda atık lastik ve cam lifin bitüme modifiye edilerek çevreye olan zararın etkileri ve depolama sorunu azaltacağı veya ortadan kaldıracağı sonucuna varılmıştır.

Furtana vd. (2019) yaptıkları çalışmada Etilen-Vinyl-Acetate (EVA) bazlı reçinenin (EBR) bitümlü karışımlarda kullanılmaları araştırılmış ve Stiren-Butadien-Stiren (SBS) modifikasyonu ile

karşılaştırmışlardır. Saf bitüm ve modifiye karışımlara indirekt çekme mukavemeti, Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme, rijitlik modülü, dinamik sünme ve indirekt çekme tekrarlı yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Etilen-Vinyl-Acetate (EVA) bazlı reçinenin (EBR) modifiye edilen bağlayıcının saf bitüme göre daha iyi bir performans sağladığı, Stiren-Butadien-Stiren (SBS) modifikasyonuna benzer bir performans değeri gösterdiği tespit edilmiştir.

Gökalp vd. (2019) yaptıkları çalışmada bitüme polimer ilave ederek bağlayıcının karakteristik özelliklerini, üretim koşullarına bağlı olarak incelemişlerdir. Bu çalışma ile polimer modifiye bitüm modifikasyonuna etki edecek parametreler üzerinde araştırma yapılmış ve konu ile ilgili araştırmacılar ve sektör temsilcileri için bir farkındalık oluşturulmaya çalışılmıştır.

Kaçaroğlu ve Saltan (2019) yaptıkları çalışmada, Cocamide Diethanolamide malzemesinin bitüm modifikasyonunda kullanılması araştırılmıştır. Saf bitüme Cocamide Diethanolamide malzemesi katkı malzemesi olarak ilave edilerek bitüm ile arasındaki davranışı, kimyasal yapısının bitüme benzer özellik taşıdığı sonucunda ulaşılmıştır. Ayrıca Cocamide Diethanolamide kimyasalı ile bitümün modifiye edilmesiyle ilgili herhangi bir çalışmanın bulunmaması da bu çalışmanın yapılmasında önemli etken olmuştur. Saf bitüme Cocamide Diethanolamide katkı malzemesinin ağırlıkça %1, %3 ve %5 katkı oranlarında 155 °C ve 165 °C modifiye sıcaklıklarında, 30, 60, 90 dakika boyunca 1000 rpm karışım hızı kullanılarak birçok modifikasyon sağlanmıştır. Yapılan modifikasyonlarla ağırlıkça %1, %3 ve %5 katkı malzemesi ile yapılan numuneler için toplam altı adet deney seti hazırlanmıştır. Hazırlanan altı adet modifikasyon numuneleri üzerinde dönel viskozimetre, yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon, deneyleri yapılmış ve katkı malzemesinin saf bitümü yumuşattığı ayrıca bitümün işlenebilir sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiştir. Saf bitüme içerisine katkı oranı eklendikçe karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında azalma olduğu ve ekonomik ve çevresel anlamda katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Yang vd. (2019) yaptıkları çalışmada, karbon kökenli malzemeler ile modifiye edilen bitümün reolojik ve mikro-yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Karbon nano-tüpler (CNTs) ve grafen (Gr) ile bitüm modifiye edilmiştir. %0,2 -3 CNT'ler ve %0,2 -1,5 GR ile saf bitüm modifiye edilerek bağlayıcının reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dinamik kesme reometresi (DSR) ile frekans taraması deneyleri yapılmıştır. Bitüm ile katkı malzemelerinin homojen karışım karışmadığı taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Yapılan deneyler ile elde edilen sonucunda CNT ve GR'nin bitüme ilave edilmesiyle saf penetrasyonlu bitüme göre sertleştiği, tekerlek izi direncini, elastiklik özelliğini, yüksek sıcaklıklardaki performansını arttığı tespit edilmiştir. 1,5 CNT ile %1 Gr ile modifiye bitümün en uygun karışım olduğu tespit edilmiştir.

Bayraktar vd. (2019) yaptıkları çalışmada, geri dönüşüm olarak kullanılmayan atıkların yol kaplama tabaklarında katkı malzemesi olarak ilave edilerek bu şekilde bertaraf edilmesi amacıyla çalışma yapmışlardır. Atıklarla modifiye edilmiş bağlayıcı kullanılarak Marshall tasarım yöntemine göre numuneler elde edilerek deney sonuçları değerlendirilmiştir. Deney sonuçları Marshall dayanımında azalmanın meydana geldiği görülmüş ancak yine de tüm numunelerin gereken standartları sağladığı

tespit edilmiştir. Bu araştırma ile endüstriyel atıkların bertaraf edilmesi ve doğaya zararı minimize edilmektedir.

Saltan ve İnkaya (2020) yaptıkları çalışmada atık plastiklerle modifiye edilmiş bitüm kullanarak bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneler Marshall Dayanım ve İndirekt Çekme Dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar plastik atık malzemelerin bitümlü bağlayıcılarda kullanılabileceği göstermiştir. Ancak optimum sonuçların elde edilebilmesi amacıyla atıkların bir ön arıtma (atık granülasyonu) yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmış ve bununla birlikte maliyetlerin artacağı da tespit edilmiştir.

Öz Kıcı ve Saltan (2020) yaptıkları çalışmada, zeytinyağı üretilmesi aşaması sonrasında ortaya çıkan pirina (zeytin posası) atığının bitüme modifikatörü olarak kullanım potansiyelini araştırılmıştır. Saf bitüme ağırlıkça 5 farklı yüzdesel oranda pirina ilave ederek modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Çalışmada saf bitüm numuneleri ve modifiye bitümler üzerinde penetrasyon, düktilite, yumuşama noktası, elastik geri dönme ve özgül ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca modifiye bitümlerle hazırlanan sıcak karışımlara indirekt çekme dayanımı testi uygulanarak, indirekt çekme dayanımı oranı (TSR) hesaplanmıştır. Modifiye edilen pirina numunelerinin nem hassasiyetine karşı performanslarında artma olduğu tespit edilmiştir. Pirina ile modifiye edilen bağlayıcının yumuşama noktası değerlerinin arttığı ve penetrasyon değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Moradı (2021) yaptığı çalışmada, Afyonkarahisar Seydiler Bölgesinde bulunan diatomitlerin bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Farklı derinlikteki dört tabakadan diatomit numuneleri alınmış ve bu malzeme ağırlıkça %7, %12 ve %17 oranlarında bitüme eklenerek bağlayıcı modifiye edilmiştir. Çalışmada diatomit numuneleri üzerinde X-Işınları Difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) gibi mineralojik ve petrografik değerlendirmelerle, X-Işınları floresans (XRF) analizi, özgül yüzey alanı ve tane boyutu dağılımı analizi yapılmıştır. Modifiye edilen bitüm numunelerine ise penetrasyon, özgül ağırlık, dönel ince film halinde yaşlanma (RTFOT), yumuşama noktası, yaşlanma sonrası yumuşama noktası, Nicholson soyulma, penetrasyon, dönel viskozimetre (RV), dinamik kesme reometresi (DSR) ölçümleri ve Vialit yapışma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları şahit olarak bırakılan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde diatomitle ile modifiye edilen numunelerin reolojik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara dayanarak diatomitlerin orta ve düşük trafik hacmine sahip yollarda ekonomik bir bitüm modifikatör olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Gökalp (2021) yaptığı çalışmada, B50/70 penetrasyonlu saf bitümü %0,5 ile %5,0 arasında altı farklı oranda Polifosforik Asit (PPA) malzeme ile modifiye etmiştir. B50/70 penetrasyonlu saf bitüm numuneleri ve modifiye bitüm numuneleri üzerinde penetrasyon, dönel viskozimetre, RTFOT, DSR ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Bitüm numunelerinin sıcaklık hassasiyetleri ile ilgili penetrasyon indeksi belirlenmiş ve sıkıştırma sıcaklıkları dönel viskozimetre testi sonuçları üzerinden tayin edilmiştir. Modifikasyon sonucunda bitümün yumuşama noktası ile viskozite değerleri artmış, penetrasyon ile sıcaklık hassasiyeti düşmüştür. Dinamik kayma Reometresi (DSR) ile yapılan reolojik

incelemede saf bitüme göre PPA modifikasyon bitümün tekerlek izine karşı direnci artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PPA katkısının saf bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini belirgin şekilde değiştirdiği tespit edilmiştir.

Kumandaş vd. (2021) yaptıkları çalışmada, Elvaloy-RET'in ile modifiye edilen numuneler üzerindeki çalışmaları incelenmiş ve Elvaloy'un modifiye bitüm üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deneye başlamadan önce Elvaloy ile ilgili genel bilgi ve karıştırılma koşulları hakkında bilgi verilmiş ardından Elvaloy'un modifiye numuneler üzerinde fiziksel ve reolojik özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan deneylere ilave olarak Elvaloy modifiyeli bitümler ile hazırlanan asfalt karışımlar üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, Elvaloy ile modifiye edilmiş numunenin saf bitüme göre sertliği ve yüksek sıcaklıklardaki performansı arttırdığı tespit edilmiştir. Elvaloy modifiyeli bitümlerin hazırlanması esnasında kullanılan karıştırma koşullarında önemli farklılıklar ortaya çıktığı fark edilmiştir.

Serin ve Demirezer (2021) yaptıkları çalışmada, bitkisel ürünlerden elde edilen yağlar ile bitümün mekanik, fiziksel ve hidrofobik özellikleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada altı farklı bitkisel yağ bitüm ile modifiye edilmiştir. Bu yağlar; kenevir yağı, defne yağı, keten tohumu yağı, kantaron yağı, hint yağı, çam terebentin yağıdır. Bu yağların en önemli özelliği soğuk pres yöntemi ile %100 saf bitkisel yağ olmasıdır. Bu yağlar bitüme %3, %5 ve %7 oranlarında eklenerek saf bitüm ile modifiye edilmiştir. Üç farklı oranda altı farklı yağ ve orijinal bitümden bir numune ile toplam on dokuz adet numune alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda modifiye edilen bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve temas açalarına bağlı olarak suya karşı hassasiyetleri, yüzey ıslatma ve hidrofobik özellikleri IMAGEJ adlı program ile tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda altı farklı bitkisel yağların orijinal bitüme göre fiziksel ve mekanik özelliklerinde ciddi değişikliklere sebep olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca modifiye edilen bitümlerin trafik güvenliği açısından önemli bir sorun olarak görülen suyun yol üzerinden uzaklaştırılmasında önemli bit katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Aydın vd. (2022) yaptıkları çalışmada, asfalt kaplamaların performansını arttırmak için styrene butadiene rubber (SBR), styrene- butadiene- styrene (SBS), crumb rubber (CR), and polyphosphoric acid (PPA) gibi bazı malzemeleri saf bitüme ilave ederek modifikasyon gerçekleştirmişlerdir. Modifikasyon esnasında asfalt bağlayıcıyı desteklemek ve geliştirmek amacıyla katkı maddeleri de kullanılmıştır. Modifiye bitümlerde en çok kullanılan malzemelerin başında Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) yer almakta olup alternatif olarak Elvaloy ile fosforik asit (PPA) kullanılmaktadır. Belirli oranlarda Elvaloy/PPA katkıları kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri yapılmıştır. Bu araştırmada bu malzemelerin reolojik ve fiziksel özellikleri etkileri de araştırılmıştır. Deney sonuçlarında kullanılan üç farklı malzemenin saf bitüme göre performansını arttırdığı tespit edilmiştir.

Geçkil vd. (2022) yaptıkları çalışmada, zeytinyağı üretiminde zeytinden atık olarak ortaya çıkan pirinanın saf bitüm ile modifiye edilmesi araştırılmıştır. B160/220 penetrasyonlu bitüm ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında pirina ilave edilerek bitüm modifiye edilmiştir. Saf ve pirina ile modifiye

edilen bitümlerin fiziksel özellikleri yumuşama noktası, duktilite ve penetrasyon deneyleri sonucunda, yüksek sıcaklıklarda işlenebilirliği ile viskozitesi dönel viskozimetre (RV) deneyi sonucunda, kalıcı deformasyonları dirençleri dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi sonucunda, kimyasal özellikleri ise ile taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri sonucunda tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda modifiye bitümün fiziksel ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri sonucunda sertleşme eğilim gösterdiği, akışkanlığını azaldığı, akışkanlığının azalması ile işlenebilirliğinin de azaldığı, Dinamik kayma Reometresi deney sonuçlarında saf bitümün (B160/220) 58°C sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı direnç gösterdiği, modifiye bitümler de 64°C sıcaklıkta deformasyon gösterdiği yaklaşık %10 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal özellikleri sonuçlarında saf bitüm ile pirinanın homojen bir şekilde karışım sergilediği, pirinanın selülozik yapısı sebebiyle karışımın sertleşme göstermesine rağmen elastik bir davranış sergilemiştir. Pirina ile bitümün sertleşmesi sonucunda işlenebilirlik sıcaklığının arttığı ancak yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncinin azaldığı tespit edilmiştir.

Çetin (2022), yaptığı çalışmada, saf bitümü nanokiller, nano kalsiyum karbonat (nano-CaCO₃), nanosilika, nano titanyum dioksit (nano-TiO₂), karbon siyahı nanotozu ilave ederek modifiye etmiştir. Saf bitüme ilave edilen nano malzemeler ile bitümün durabilitesi, depolama stabilitesi ve suya karşı hassasiyeti vb. özelliklerinde iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada nano malzemeler ile ilgili daha önce yapılan araştırmalar incelenmiş ve bu çalışma ile karşılaştırılarak araştırmacılar için farklı bakış açısı sağlanmaya çalışılmıştır.

Tacıroğlu (2023) yaptığı çalışmada, Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ve Elvaloy katkıları ile modifiye edilen bitüm numunelerinin reolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada saf bitüme (B50/70) Elvaloy katkısı %1,6, %1,7 ve %1,8 oranlarında ve SBS katkısı %4,0, %4,5 ve %5,0 oranlarında eklenmiştir. Polimer Modifiye Bitüm teknik şartnamesi kriterleri içerisinde penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi, elastik geri kazanım, parlama noktası, dinamik kesme reometresi, kiriş eğme reometresi, rotasyonel ince film fırını ve basınçlı yaşlandırma kabı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarında deneye tabi tutulan iki malzemenin de şartname sınırları dahilinde olduğu tespit edilmiştir. Depolama stabilitesi sonuçları incelendiğinde Stiren-Bütadien-Stiren modifiye bağlayıcıların karıştırma esnasında homojen olmayan dağılımının depolama stabilitesi sonrasında bağlayıcının davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şehnaz Tıraş (2023) yaptığı çalışmada, Mersin bölgesinde son yıllarda zeytinyağı fabrikalarının artması ile fabrikalarda üretim atığı olan pirina yağının bitüm modifikatörü olarak kullanım potansiyelini araştırmıştır. Çalışma kapsamında saf bitüme ağırlıkça %1, %2, %4 ve %8 oranlarında pirina yağı ilave edilmiştir. Daha sonra modifiye bitüm numuneleri üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, dinamik kesme reometre (DSR), dönel ince film halinde yaşlanma (RTFOT) ve yaşlanma sonrası penetrasyon ile yumuşama noktası, kiriş eğme reometre (BBR), Vialit yapışma, Nicholson soyulma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre elde edilen modifiye bitümün sathi kaplamalı yollarda kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca geri dönüşümü yapılması gerekli olan

yaşlanmış bitüm için modifikatör olarak pirina yağı kullanılarak fiziksel ve reolojik özelliklerinin incelenebileceği öngörülmüştür.

2.2. Atık Malzemelerin Filler Olarak Asfalt Karışımında Kullanımı

Bitümlerin sıcaklığa bağlı duyarlılığını azaltabilmek ve üstyapı hizmet ömrünü artırılması amacıyla atık malzemeler bitüme filler malzemesi olarak ilave edilerek asfalt karışımlar modifiye edilmiştir.

Terzi ve Karaşahin (2003) yaptıkları çalışmada birbirine yakın granülometri eğrisine sahip mermer tozu ile taş tozu içeren numuneleri Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuş ve optimum bitüm yüzdesini hesaplamışlardır. Deneye tabi tutulan numunelerin plastik deformasyonu ve birim deformasyonu ölçülmüştür. Elde edilen deformasyon sonuçları ve filler/bitüm oranı ile optimum bitüm oranı kullanılarak optimum bitüm yüzdesi hesaplanmıştır. Sonuç olarak, mermer tozunun daha fazla olduğu bölgelerde mermer tozunun taşınması ve kurutuma maliyetleri hesaplanarak filler maliyetini geçmediği yerlerde asfalt betonu karışımlarında mermer tozunun taş tozu yerine kullanılabilmesi kanaati oluşmuştur.

Ahmedzade vd. (2008) yaptıkları çalışmada, siyah karbonunun filler malzemesi olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Aynı gradasyon ölçülerine sahip olan kalker malzemesi yerine siyah karbon filler malzemesini bitümlü sıcak karışımlarda kullanmışlardır. Asfalt betonunda olumlu etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir. Sıcak karışımların stabilitesini, durabilitesini artırarak tekerlek izi oluşumu ile ilgili sorunları azalttığı Marshall stabilitesi, indirekt çekme rijitlik modülü, sünme sertliği ve indirekt çekme direnci deney sonuçlarında görülmüştür. Yapılan deney sonuçlarında siyah karbonun asfalt karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılması karışımların özelliklerini iyileştirdiği ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

Raufi (2018) yaptığı çalışmada, bitüm ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında nano-Bentonit, %3, %6 ve %9 oranlarında nano-CaCO₃ ve %0.1, %0.2 ve %0.3 oranlarında nano-organoliasan olmak üzere farklı üç farklı nano malzemeyi bitüme ilave etmiştir. Bu çalışmanın amacı bitümlü bağlayıcıların reolojik ve fiziksel özelliklerinin inceleyerek üç malzemenin bitüm içerisindeki oranın tespiti ve asfalt karışımlarındaki mekanik davranış ve performansını incelemektir. Bitüm ile nanomalzemelerin homojen olarak dağılması için yüksek devirli karıştırıcı kullanılmıştır. Modifiye edilen numuneler üzerinde reolojik ve geleneksel deneyler yapılmıştır. Modifiye edilen bitüm içerisindeki nanopatiküller ile nanoteknoloji katkı maddesinin dağılımı flüoresan mikroskopu ile incelenmiştir. Optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi amacıyla Marshall stabilite ve akma deneyleri yapılmıştır. Asfalt karışımların neme karşı duyarlılığının belirlenmesi amacıyla modifiye Lottman (AASHTO T283) deneyi yapılmış ve numunenin çekme direnci hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, nanomalzemelerinin saf bitümün fiziksel özelliklerinde (yumuşama noktası, penetrasyon) fazla bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak yüksek sıcaklık performansını, depolama stabilitesini, yaşlanma direncini ve reolojik

özelliklerini arttırmıştır. Modifiye numunelerin optimum değerlerinin daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca modifiye Lottman deneyi sonuçlarına göre çekme direncinde artış meydana gelmiştir.

Öner (2019) yaptığı çalışmada polimer modifiye bitüm numunelerine nanokil ilave ederek bağlayıcının depolama stabilitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, polimer modifiye bitüm katkısı olarak SBS ve nanokil türü olan Halloysit seçilmiştir. Katkı oranları SBS için %3, %5 ve Halloysit için %2, %4 olarak seçilmiştir. Öncelikle saf bitüm içerisine polimer, daha sonra üretim işlemi devam ederken modifiye bağlayıcıya Halloysite ilave edilmiştir. Her numuneden ince kesit numuneler alınarak mikroskop ile incelenmiş ve depolama stabilitesi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarında Halloysit katkı malzemesinin depolama stabilitesini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iyileşme etkisi polimer yüzdesine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Polimer yüzdesi düştükçe iyileşmenin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Taciroğlu vd. (2022) yaptıkları çalışmada, cam fabrikalarından çıkan atık kuvars kumunun sıcak bitümlü karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık malzeme filler olarak, kireçtaşı fillerin yerine %25, %50, %75 ve %100'ü oranlarında ikame edilmiş ve optimum bitüm muhtevaları belirlenmiştir. İndirekt çekme testine tabi tutulan numunelerin mukavemet değerleri ve nem duyarlılığı belirlenmiştir. Mukavemet değerleri referans numuneye kıyasla daha iyi sonuçlar göstermiştir. Çekme Dayanımı Oranının (TSR) %50 içerikte tepe noktasına ulaştığı görülmüş ve tüm numunelerin %80 sınır değerini sağladığı tespit edilmiştir. Karışımların tekerlek izi performansını belirlemek için Hamburg Tekerek İzi testi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi tekerlek izi performansı atık malzemenin %50 oranında kireçtaşı filler yerine ikame edildiği numuneler için elde edilmiştir. Ayrıca tüm karışımların şartnamede belirtilen maksimum 12,5 mm tekerlek izi değerini sağladığı tespit edilmiştir.

Timori ve Tigidemir (2022) yaptıkları çalışmada, Kütahya Tavşanlı ilçesinde bulunan Tunçbilek Termik Santralinden çıkan uçucu külün (UK) asfalt betonda filler malzemesi olarak kullanılmasını araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle Superpave Tasarım Yöntemine göre gradasyon sınırlarında agrega oranlarının değiştirilmesi ile üç tip agrega eğrisi oluşturulmuştur. Bu oluşturulan üç tip gradasyon eğrisine bitüm oranının belirlenmesi amacıyla UK filler içerisinde %25, %50, %75, %100 oranlarında ilave edilmiş ve numuneler bu oranlara uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan numuneler AASHTO T283 standardına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Hazırlanan numunelerin neme olan hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla İndirekt Çekme Dayanım (ITS) Deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda UK'nin kullanımı ile herhangi bir katkı maddesi kullanılmayan sıcak karışımlara göre daha yüksek İndirekt Çekme Dayanım Oranı (TSR) sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlar göre UK ile hazırlanan bir numunenin neme karşı daha dirençli olduğu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla şiddetli ve uzun süreli yağış alan bölgelerde UK'nin katkı olarak kullanılmasının daha fazla verimli olacağı ortaya çıkmıştır. Ayrıca UK'nin yol üstü yapısında aşınma tabakasında kullanılması ile çevre kirliliği ve ekonomik açıdan olumlu katkılar sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Sümen ve Morova (2022) yaptıkları çalışmada, atık serpantin tozlarının bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) filler olarak kullanılması araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak kireçtaşı kökenli filler kullanılarak Marshall briketleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış numunelere Marshall stabilite ve akma deneyleri yapılmış ve pratik özgül ağırlığı (D_p), agregalara arası boşluk yüzde oranı (VMA), boşluk yüzde oranı (V_h), asfaltla dolu boşluk yüzde oranı (V_{fa}) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak grafikler oluşturulmuş ve optimum bitüm yüzdesi tespit edilmiştir. Optimum bitüm muhtevasında kireçtaşı filler ile serpantin filler malzemesi yer değiştirilerek (%25, %50, %75 ve %100 oranlarında) serpantin ikameli asfalt betonu numuneler üretilmiştir. Serpantin filler ikameli briketlerin VMA, V_h, V_{fa}, D_p değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %50 oranında serpantin ikameli numunelerin en yüksek stabilite değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Canpolat vd. (2022) yaptıkları çalışmada, atık olivin mineralinin filler malzemesi olarak kullanılması ile ilgili çalışma yapmışlardır. Atık olivin malzemesi ferrokrom tesislerinde kromit cevherinin zenginleştirilmesi ile ortaya çıkmaktadır. İlk aşamada filler olarak %4.7 oranında geleneksel kırmataş kalker agregası alınmış ve %3.5, %4.0, %4.5, %5.0, %5.5 oranlarında bitüm kullanılarak optimum bitüm yüzdesi hesaplanmıştır. İkinci aşamada filler olarak kullanılan kırmataş kalker agregası tozuna %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında atık olivin ilave edilerek karışım numuneleri üzerinde agregalar arası boşluk yüzdesi, akma, pratik özgül ağırlık, boşluk yüzdesi ve Marshall stabilite deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre atık olivin minerallerinin filler malzemesi olarak asfalt betonunda kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada bağlayıcı olarak B50/70 penetrasyon sınıfına ait bitüm ve modifikatör olarak atık kuvars kumu kullanılmıştır.

3.1.1 B50/70 Penetrasyonlu Bitüm

Bağlayıcı bitüm Karayolları 5. Bölge (Mersin) Müdürlüğüne bağlı 3 Nolu Asfalt (İskenderun) Şantiye Şefliğinden temin edilmiştir. Bağlayıcı bitümün üretim yeri ise Batman rafinerisidir. B50/70 penetrasyon derecesine sahip bitümün fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1.'de belirtilmiştir.

Tablo 3. 1. 50/70 Penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri

Özellikleri	B50/70	Standardı
Penetrasyon (mm)	59,65	TS EN 1426
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1,033	TS EN 12598
Yumuşama Noktası (°C)	55,70	TS EN 1426
Yanma ve Parlama Noktası (°C)	300 - 295	TS EN ISO 2592

3.1.2. Atık Kuvars Kumu

Kuvars kumu (perlit, ponza ve diatomit kumtaşı, kuvarsit, pegmatit, hidrotermal kuvars gibi minerallerle birlikte), yalıtımlı ve hafif yapı malzemeleri alt başlıklarında gruplandırılmaktadır. Ülkemizde cam yapıcı oksitler olan kuvars, kumtaşı, kuvarsit, pegmatit, hidrotermal kuvars vb. oluşumlarda en az %95 ve üzerinde SiO₂ (Silisyum dioksit veya silikat) içermelidir. Gerekli oranlardaki kriterleri sağlayan hammaddeler cam sanayinde kuvars kumu (silika kumu) olarak kullanılırlar (Köse & Türeli, 1986). Kuvars kumu, granit türü kayaçların ayrışmasının sonucu oluşan 2 mm'den küçük kuvars (SiO₂) tanecikleridir. Refrakter sanayisinde, döküm sanayisi, silika tuğla üretiminde ve cam sanayisinde, yapı kimyasalları spor tesisleri vb. birçok kullanım alanı bulunmaktadır.

Cam üretiminde kuvars kumu hammadde kırma işlemine tabi tutularak 20 mm boyuta getirilir. Daha sonra öğütülen malzemeler cam kumu hazırlama tesisinde yaş eleme işlemine tabi tutulur (Karakılçık & Sedat, 2019). Cam üretimi için gerekli malzemelerin çıkarılmasından sonra geriye kuvars kumu atık çamuru kalır. Tehlikeli olarak sınıflandırılmayan bu atık malzeme 300 µm'den küçük ince partiküllerden oluşmaktadır. Ancak bu tane boyutundaki atık malzemelerin toprağın su süzme kapasitesini azaltması, bitki örtüsünün gelişimini engellemesi, göl ve göletlerin su tutma kapasitesini düşürmesi, küçük partiküllerin uçarak hava kirliliğine yol açması ve atık depolama alanlarında çevre estetiğini bozması gibi birçok çevresel soruna neden olduğu bilinmektedir (Öztürk, 2018). Ayrıca gerekli

önlemler alınmadığı takdirde atık kuvars kumu yaz ve bahar aylarında havayı kirletebilmektedir. Bu nedenle astım ve akciğer kanseri başta olmak üzere ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir (Tacıroğlu, Ergezer, Baykal, Eriskin, & Terzi, 2022).



Şekil 3.1. Atık kuvars kumu

Karakılçık ve Türkmen (2019), çalışmalarında Mersin ve çevresinde faaliyet gösteren cam fabrikalarında yılda yaklaşık 17.2×10^6 ton atık çamuru ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Literatürde cam fabrikalarında üretim sonrası ortaya çıkan atık kuvars kumu çamurunun geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada saf bitüme filler boyutun da atık kuvars kumu ilave edilerek bağlayıcının modifiye edilmesi amaçlanmıştır.

Atık kuvars kumu içerisindeki moleküler bileşikleri ve bu yolla atık malzeme içerisinde insan sağlığına ve çevreye zararlı moleküler bileşiklerin olup olmadığı belirlemek için X-Işınları Floresan Spektrometre (XRF) analizi yapılmıştır.

3.2. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm içerisine ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu ilave edilerek 180 °C sıcaklıkta, 800 devir/dakika hızla, 180 dakika karıştırılarak modifiye bitüm

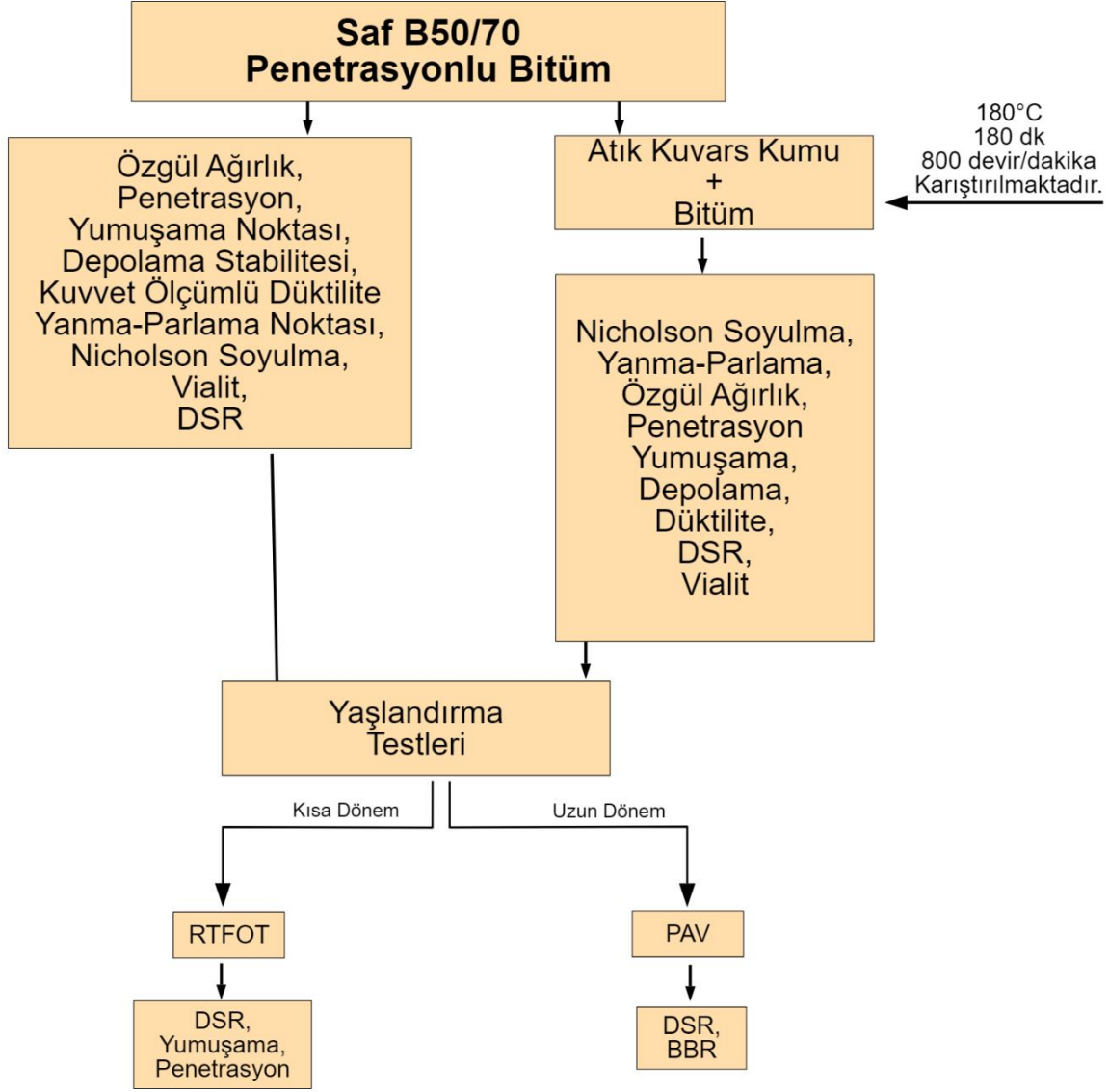
numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.2.A.). Hazırlanan modifiye bitüm numuneleri karıştırma işleminden sonra numune kaplarına Şekil 3.2.B’de gösterilen numune kaplarına aktarılmıştır.



Şekil 3.2. Bitüm ile atık kuvars kumu karıştırıcısı ve numune kapları

3.3. Yöntem

B50/70 penetrasyonlu bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu eklenmesiyle hazırlanan modifiye bitüm numunelerine ve katkısız saf bitüm numunelerine özgül ağırlık, yanma-parlama, penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi, duktilite, dinamik kesme reometresi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kırılgan eğilme reometresi (BBR), kuvvet ölçümlü duktilite deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.3.’de bu tez çalışmasında yapılan deneyler ait akış şeması gösterilmektedir.



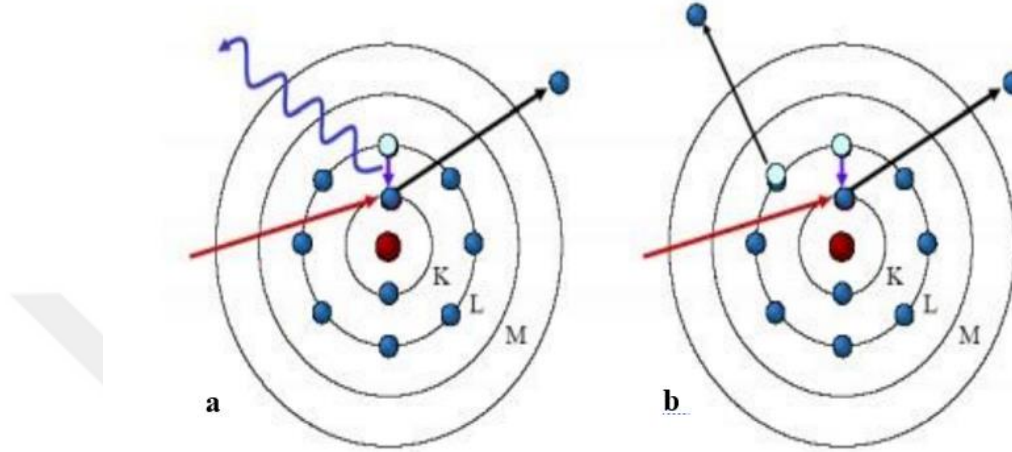
Şekil 3.3. Deneysel çalışmaya ait akış şeması

Bağlayıcı testlerinin dışında atık kuvars kumu içerisindeki moleküler bileşikleri ve bu yolla atık malzeme içerisinde insan sağlığına ve çevreye zararlı moleküler bileşiklerin olup olmadığı belirlemek için X-Işınları Floresan Spektrometre (XRF) analizi yapılmıştır. Son olarak atık malzemenin bitüm içerisinde dağılımını gözlemek için de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile karışımların morfolojik yapısı incelenmiştir.

3.3.1 X- Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF)

Elektromanyetik spektrum, görünen ışıklar gibi X ışınlarına sahiptir. X ışınlarının boyları 10^{-8} – 10^{-11} 'm'dir. Ancak görünen ışık boyları $8 \cdot 10^{-7}$ – $4 \cdot 10^{-7}$ m ve daha uzun daha uzun olmaktadır. X ışınları analizi yapılacak numune üzerine gönderilir. Numunedeki atomlarla etkileşen ışınlar gerekli

kinetik enerji sahip olmaları durumunda numunenin içerisindeki atomun içerisindeki elektron kopararak yüksek enerjiye getirir. Üst kabuklarda bir elektronun oluşan boşluğu kapaması ile enerji oluşmakta ve atom tekrar eski haline dönüşmektedir. Ortaya çıkan enerji karakteristik floresan ışınıdır. Şekil 3.4’de verilmiştir. Karakteristik ışınların dalga boyları sabit olmakla birlikte incelenen malzemedeki elementin karakteristiğini belirleyerek numunenin kimyasal analizinin yapılmasını sağlar (Güzelçiçek, 2019).



Şekil 3.4. a) Karakteristik X-ışını emisyonu, b) Auger elektron emisyonu (Güzelçiçek, 2019)

X-Işınları Floresan Spektroskopisinde (XRF), tahribatsız olması, kolayca hazırlanabilmesi, kesinlik ve doğruluğun fazla olabilmesi, konsantrasyon aralığının geniş olması, sıvı ve katı gibi numune analizine uygun yüksek olması en önemli faydaları arasında görülmektedir.

3.4. Modifiye Bitüme Uygulanan Deneyler

3.4.1. Özgül Ağırlık Tayini Deneyi

Deney numunesi TS EN 58’e göre alınmakta ve TS EN 12598’e göre hazırlanır. Deneyin amacı bitümlü bağlayıcıların özgül ağırlığı ve yoğunluğunun belirlenmesidir. Düşük viskoziteye sahip bitümler, viskoziteli asfaltlar ve yarı katı bitümlü bağlayıcılar eşit oranda/hacimde karşılaştırılarak yapılır. Konik şekilde piknometrenin tıpası ile birlikte boş ağırlığı tartılır. Daha sonra piknometrenin içerisine 25°C damıtılmış su ile doldurularak tıpası kapatılır ve piknometrenin dışarısına taşan su kuru bir bezle silinip tartılır. Bitüm numunesi piknometrenin tamamı dolacak şekilde doldurulur. Piknometreden taşan kısımları temiz ve kuru bir bezle silinir. Dolu halde olan piknometre tartılır. En az 2 ölçüm yapılmalı ve yapılan ölçümlerin ortalaması alınmalıdır. Ancak yapılan ölçümler arasındaki fark 2kg/m^3 ’ten fazla olmamalıdır. Şekil 3.5’de özgül ağırlık deneyi piknometre kabı görülmektedir.



Şekil 3.5. Özgül ağırlık deney beheri

3.4.2. Yanma-Parlama Noktası Deneyi

Bu deney TS EN ISO 2592 standartlarına göre deney yapılmaktadır. Deneyin amacı bitümün ısıtılması esnasında oluşabilecek herhangi bir alev alma veya tutuşma sıcaklığının belirlenmesidir. Bitümün alevle teması halinde parlamanın olması ancak sürekli/devamlı yanma işleminin olmadığı sıcaklık derecesini ($^{\circ}$) bulmak amacıyla yapılan bir deneydir. B50/70 penetrasyonlu bitüme ve modifiye yanma- parlama noktası deneyi için numune etüvde ısıtılıp deneyin yapılacağı kaba bitüm aktarılır. Bitüm kaba aktarıldıktan sonra bitüm ısıtılarak içindeki ısı ölçer ile bitümün kaç $^{\circ}$ C'de parlama ve yanma gerçekleştiği tespit edilmektedir. Şekil 3.6'da parlama-yanma noktası deneyi cihazını görülmektedir.



Şekil 3.6. Parlama-Yanma noktası deneyi cihazı

3.4.3 Penetrasyon Deneyi

Bitümün kıvamının ve sertliğini belirlenmesi için yapılan penetrasyon deneyi TS EN 1426 standardına göre yapılmaktadır. Deney numuneleri TSE EN 58'e göre alınmaktadır. Deney numuneleri etüvde ısıtıldıktan sonra yarıçapı en az 5,5 cm en fazla 7,0 cm olan metal kalıplara doldurulur. Kaba doldurulan deney numuneleri oda sıcaklığında bekletilip soğutulduktan sonra su banyosunda en az 1-1,5 saat 25°C'de ortam sıcaklığında bekletilir. Su banyosunda şartlandırılan numuneler daha sonra deney cihazına yerleştirilerek penetrasyon iğnesi numune yüzeyinin sıfır konumuna getirilir. Her bir okuma için 5 saniyede 100 gramlık bir penetrasyon iğnesinin batma miktarı okunur. Yapılan her okuma için temiz iğne kullanılır. Numunenin farklı noktalarında penetrasyon okumaları alınacak şekilde deney en az üç kere tekrar edilir. Deney sonunda yapılan penetrasyon ölçümlerinin ortalaması alınarak bitüm numunesinin penetrasyon değeri belirlenir. Şekil 3.7'de penetrasyon deneyi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.7. Penetrasyon deneyi cihazı

3.4.4. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 standardına göre yapılmaktadır. Deneyin amacı bitümlü bağlayıcıların 28°C ile 150°C arasındaki yumuşama noktasını belirlemektir. Böylece bağlayıcının kıvamı ve sertliği belirlenmektedir. Deney numuneleri TSE EN 58'e göre alınmakta ve TS EN 12594'e göre deney numuneleri hazırlanmaktadır. Deney numuneleri etüvde ısıtıldıktan sonra deney cihazının iki pirinç halkaya doldurulur ve oda sıcaklığında en az 30 dakika bekletilir. Deney için hazır hale getirilen numune halkaları aparatlar vasıtasıyla deneyin yapılacağı su dolu beher içerisine yerleştirilir. Sonraki aşamada beher içerisindeki su 5 °C kadar soğutulur. Daha sonra deney numuneleri üzerine çelik bilyeler yerleştirilir ve deneye başlanır. Deneye başlandıktan sonra su sıcaklığı her bir dakikada 5 °C artırılır. Artan sıcaklığa bağlı olarak deney numuneleri üzerindeki bilye yükü nedeniyle yumuşayarak aşağıya doğru akmaya başlar. Akan bitüm numunelerinin beher tabanına değdiği andaki sıcaklık yumuşama noktası olarak belirlenir. İki adet halka numunenin yenildiği sıcaklık arasındaki fark, yumuşama noktası 80°C altındaki numuneler için 1 °C, 80°C üzerindeki numuneler için 2 °C'den fazla

olmamalıdır. Yapılan deney sonuçları 80°C altındaki numuneler için 1°C ve 80°C üzerindeki numuneler için 2 °C'den fazla olması halinde deney tekrarlanmalıdır. Şekil 3.8'de yumuşama noktası deneyi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.8. Yumuşama noktası deneyi

3.4.5 Depolama Stabilitesi Deneyi

Bu deney modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıktaki (180°C) depolama stabilitesinin ölçülmesi amacıyla TS EN 13399 standardına göre yapılmaktadır. Deney için TS EN 58' ve TS EN 12594'e göre yeterli miktarda numune alınır. Numuneler homojen olacak şekilde ısıtılır ve 16 cm uzunluğunda 2,5 ile 4,0 cm çapında bir tarafı kapalı ve tüplere doldurulur. Deney tüpleri 10 ile 12 cm yüksekliğinde olacak şekilde doldurulmalı ve üzerinde kabarcık olmamasına dikkat edilmelidir. Daha sonra numuneler üç gün boyunca 180 °C sıcaklıkta etüvde bekletilir. Tüpler etüvden çıkarılıp 1 saat oda sıcaklığında soğutulduktan sonra üç eşit parçaya bölünür. Alt ve üst olarak ayrılan numuneler etüvde ısıtılarak penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri için kalıplara dökülür. Şekil 3.9'da depolama stabilitesi tüpleri görülmektedir.



Şekil 3.9. Depolama stabilitesi numuneleri

3.4.6. Düktilite Deneyi

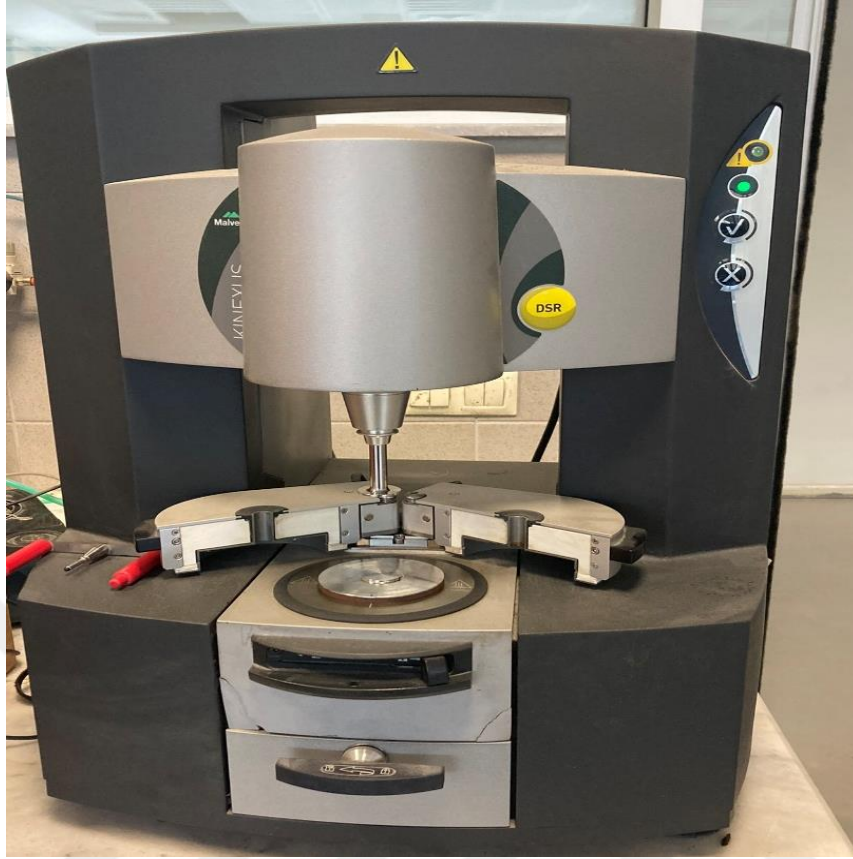
TS EN 13589 standardına göre yapılmaktadır. Bu deneyin amacı bitümün çekme özelliğinin ve düktilitesinin belirlenmesidir. Düktilite, bitümün uzama veya çekilebilme anlamına gelmekte ve bitümün önemli özelliklerinden biridir. Uzayabilme yeteneği fazla olan bitümler, düktilite değeri daha düşük olan bitümlere göre daha üstün bir bağlanma yeteneğine sahiptirler. Ancak düktilite değeri yüksek olanlar bitümler ise ısı değişimlerine duyarlılıkları daha fazladır. Numune ısıtılarak parçalı pirinç kalıba yerleştirilir. Yerleştirme esnasında parçalı kalıbın sabit tutulması gerekir. Plakanın her iki yüzeyi kalıp ayırıcı kapatılır. Kalıba dökülen numuneler su banyosuna yerleştirilerek 90 dakika bekletilir. Daha sonra numune içeren kalıplar düktilite cihazına yerleştirilir. Numuneler sabit bir hızla (5 cm/dakika) çekilir ve numunede oluşan kopma veya maksimum uzunluğa ulaşıldığında elde edilen uzunluk cm cinsinden ölçülür. Üç okuma sonucunda ortalaması alınarak rapor yazılır. Şekil 3.10'da düktilite deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.10. Düktilite numuneleri

3.4.7. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

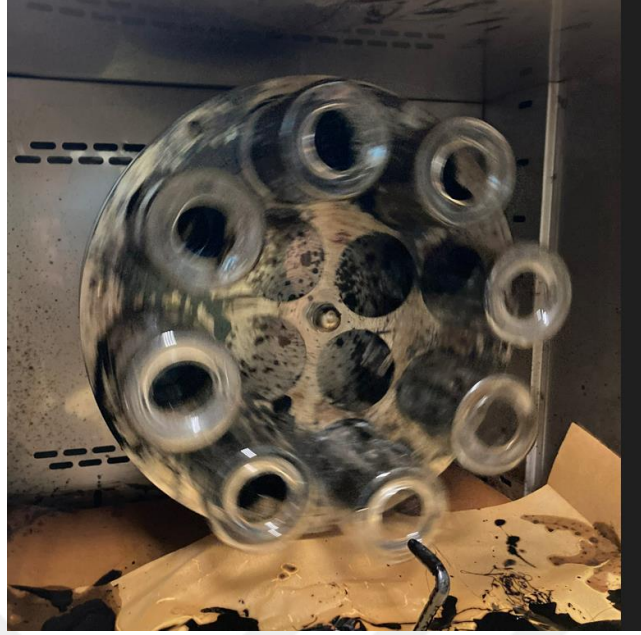
Dinamik kesme reometresi deneyi, asfalt bağlayıcının orta ve yüksek servis sıcaklıklarında viskoelastik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Bu deney ile bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve yorulma dayanımı belirlenir. Deney TS EN 14770 standardına göre yapılmaktadır. Bu deney geri kazanılmış, yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış bitümlü bağlayıcılar ile katbekli bitümlü bağlayıcılara da uygulanabilir. Deneye tabii tutulacak numune ısıtılarak homojen hale getirildikten sonra kalıplara dökülür. Kalıpta soğuma işlemi saf bitümler için 2 saat, polimer bitümler için 12 saat ve diğer bağlayıcılar için 3 saattir. Test numuneleri 1 mm kalınlık (yükseklik) ile 25 mm çapında veya 2 mm kalınlık (yükseklik) ile 8 mm çapında oluşturulur. Test sırasında plakalardan biri diğer plakaya göre önceden belirlenen dönme deformasyon genlikleri ve frekanslarda salınım yapar. Burada gereken genlik bağlayıcının kompleks kayma modülüne (G^*) bağlıdır ve ölçümlerin doğrusal davranış bölgesi içerisinde kalması için gerekli genlikler seçilir. Test numunesi, plakaların ısıtılması ve soğutulması ile ± 1 °C test sıcaklığında tutulur. Salınımlı yükleme frekansları, sinüzoidal dalga formu kullanılarak 1 ile 100 rad/s arasında değişebilir. Şartname testi 10 rad/s test frekansında yapılır ve kayma modülü (G^*) ile faz açısı (δ) bilgisayar yazılımı kullanılarak otomatik olarak hesaplanır. Şekil 3.11’de dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.11. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi cihazı

3.4.8. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi

TS EN 12607-1 standardına göre yapılmaktadır. Deneyin amacı bitüm üzerindeki hava etkisiyle kısa dönem yaşlandırmasını ölçmektir. RTFOT deneyi viskozitesi yüksek bitümlerde uygulanmamalıdır. Deney numuneleri TS EN 12594'e göre hazırlanmalıdır. Deney yapılacak numuneler farklı bir kaptan ısıtılarak akışkan bir hale getirilir. 8 adet cam kaplara 35 gram numune aktarılır. Deney numuneleri hava akışına maruz bırakılır. Numuneler 75 dakika boyunca 163 °C'de bekletilir. 75 dakika sonunda cam kaplar etüvden çıkarılır. İki adet numune 60 dakika boyunca oda sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakılır. Diğer altı cam kaplardaki numune soğuyup katılaşmadan toplama kabına boşaltılır. Hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilmelidir. Numunede oluşan azalma negatif yüzde, artma ise pozitif yüzde olarak değerlendirilir. Numunedeki kütle değişimi iki değerlerin ortalaması alınarak değerlendirilir. Şekil 3.12'de dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deneyi cihazı görülmektedir.



Şekil 3.12. RTFOT deney numuneleri

3.4.9. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Asfalt kaplamalar trafiğe açılıp hizmet süresi boyunca meydana gelen yaşlandırmayı test eden bir yöntemdir. TS EN 14769 standardına göre yapılmaktadır. Basınçlı yaşlandırma kabı koşullandırma sıcaklığına ulaşana kadar önceden ısıtılır. Isıtılan PAV kabı tartılıp ($50,0 \pm 0,5$) gram numune PAV kabına dökülür. Dökülen numune kabın bütün yüzeyine ulaşması sağlanır.

Bitüm içerisindeki kimyasal birleşimim ile karmakarışık bir yapıya sahip olmakla ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim ile bitümün koşullandırma sıcaklığı mümkün oldukça düşük tutulur. Dolu kaplar (Şekil.3.13) numune raflarına yerleştirilir. Raflara yerleştirilen numuneler PAV cihazına yerleştirilerek basınçlı kap kapatılır. Kap içerisindeki sıcaklık kayıplarını önleyebilmek amacıyla şartlandırma aşaması mümkün olduğunca hızlı şekilde gerçekleştirilmelidir. Eğer kap içerisindeki yaşlandırma sıcaklığı 5°C ile 20°C arasında değil ise ($2,1 \pm 0,1$) MPa basınç uygulanır. Belirlenen yaşlandırma sıcaklığına 2 saat içerisinde ulaşılmazsa deneye devam edilmez.

Yaşlandırma süresinin tamamlanması ile PAV deney cihazı basınç tahliye vanası kullanılarak içerideki hava basıncı yavaş yavaş tahliye edilir. İçerisindeki hava basıncının atmosfer basıncına ulaşabilmesi için 8 ile 15 dakika arasında ayarlanır.

Atmosfer hava basıncına ulaşan PAV deney cihazı açılarak raflardan çıkarılan numunelerde hava kabarcıkları bağlayıcı içerisinde bulunabilmektedir. Böyle durumlarda bağlayıcı numune kaplarını vakumlu etüvlere (170 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 'de yerleştirilir. Vakumlama uygulaması yapılmadan kaplar (10 ± 1) dakika etüvde dengeleme sağlanması amacıyla tutulur. Dengeleme sonrasında kaplar ($15 \pm 2,5$) kPa değerine düşülür ve (30 ± 1) dakika basınç altında tutulduktan sonra vakum bırakılarak kap etüvden çıkartılır. PAV kalıntıları uzun dönem yaşlandırma aşamasından sonra gerçekleştirilmemesi durumunda numune

kapları soğutulup kapatılarak oda sıcaklığında saklanır. Şekil 3.13’de PAV deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.13. PAV sonrası numuneler

3.4.10. BBR (Kiriş Eğilme Reometresi) Deneyi

Bitümün bu deney ile düşük sıcaklık özellikleri değerlendirilerek düşük sıcaklıklarda meydana gelen termal çatlama potansiyeli değerlendirilir. Deneyde uzun dönem yaşlandırılması sağlanmış (PAV kalıntısı) bitüm numuneleri kullanılır.

BBR deneyi ile bitümlü bağlayıcının; sabit bir yüklemeye karşı dayanımının ölçüsü olan sünme sertliği ve yükler uygulanmasıyla beraber bitümün sertliğinin nasıl değiştiğinin bir ölçüsü olan sünme oranı belirlenir. Burada sünme sertliği çok yüksekse bitüm malzemesi gevrek davranış gösterecek ve çatlama potansiyeli artacaktır. Deney sırasında herhangi bir zamanda kiriş numunesine uygulanan yük değeri ile sapma miktarı bilindiği zaman malzemenin sünme sertliği mühendislik kiriş mekaniği kullanılarak hesaplanabilir. Bağlayıcı şartnamesi, bağlayıcının hizmet edeceği iklimi dikkate alarak sünme sertliği (s) ve sünme oranı (m) değerlerini sınırlayarak asfalt kaplamada düşük sıcaklıklarda görülen çatlak oluşum potansiyelinin azaltılmasını sağlar. İki ucundan destekli olan asfalt kiriş numunesinin orta noktasından yük uyguladığı uç kısmı sivri olmayan bir şaft (silindir mili) kullanılır. Asfalt kiriş numunesi üzerine yük uygulandığı zaman sürtünme direncini ortadan kaldırmak için hava yatağı içine eklenen yüklemeye şaftına bir yük hücresi monte edilmiştir. Yükün uygulanmasıyla beraber kiriş numunesi üzerinde oluşan sapsmaları gözlemlmek için şaftın üzerine bir sapma ölçüm dönüştürücü

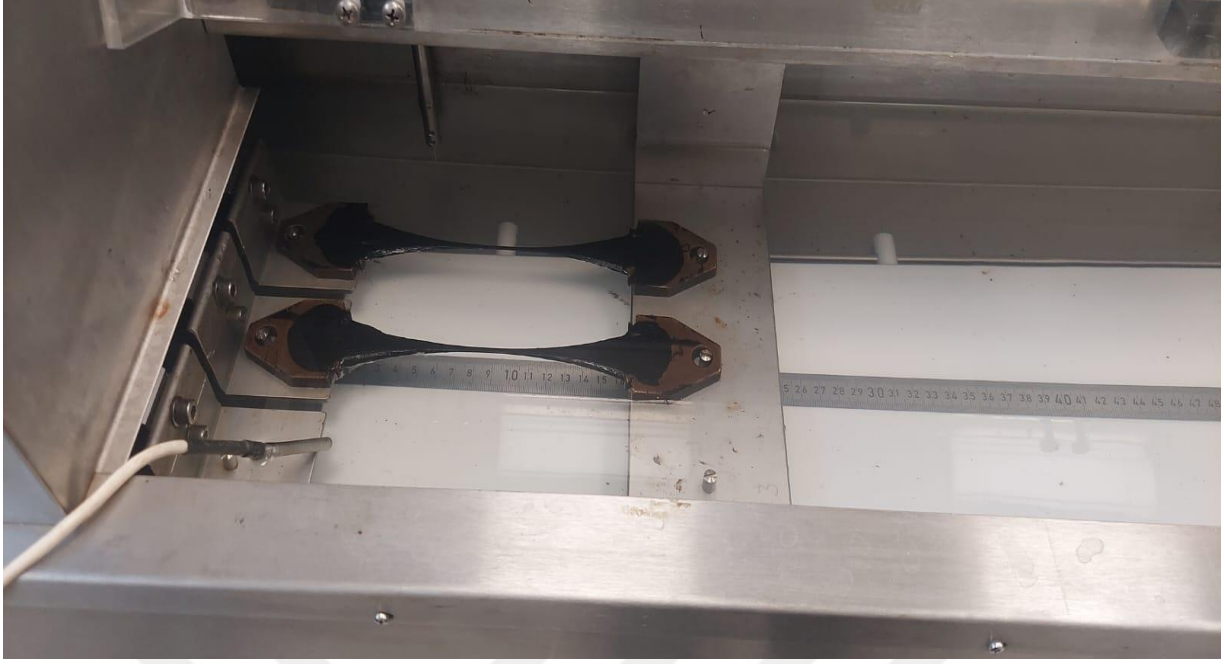
cihaz takılmıştır. Numune üzerine uygulanan yük pnömatik basınç ile uygulanır ve yükleme şaftındaki yükün ayarlanması için ayarlayıcılar sağlanır. Etilen glikol, metanol ve sudan oluşan sıvı banyosu, sıvı sıcaklığını 0,1 °C duyarlılıkta kontrol eden sirkülasyon banyosu arasında dolaştırılır ve test sürecini bozmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.14. BBR numune kalıpları

3.4.11. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi

Kuvvet ölçümlü düktilite testleri ile polimer modifiye bitümdeki bitümlü bağlayıcının çekme özelliklerinin belirlenmesini kapsar. Deney TS EN 13589 standardına göre yapılmaktadır. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi numunesi klasik düktilite deney numunesinin hazırlanma prosedürü kullanılarak oluşturulur. Parçalı deney kalıbından çıkarılan deney numunesi kırılana ya da en az % 1333 (400 mm) uzama görülene kadar sabit hızda ve deney sıcaklığında düktilometrede uzatılır. Modifiye bitümlü bağlayıcıların çekme özellikleri belirlenmektedir. Şekil 3.15’de kuvvet ölçümlü düktilite deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.15. Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi

3.4.12 Penetrasyon İndeksi (PI)

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarını belirlenmesi amacıyla yumuşama noktası deneyi ve penetrasyon deneyi sonuçlarının kullanılması ile penetrasyon indeksi değeri belirlenmektedir. İndeks genellikle -2 ile +2 aralığında bulunmakta ve yüksek olan PI değeri bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki hassasiyeti anlamını taşımaktadır. İndeks için aşağıdaki formül ile belirlenmektedir.

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

PI= Penetrasyon İndeksi

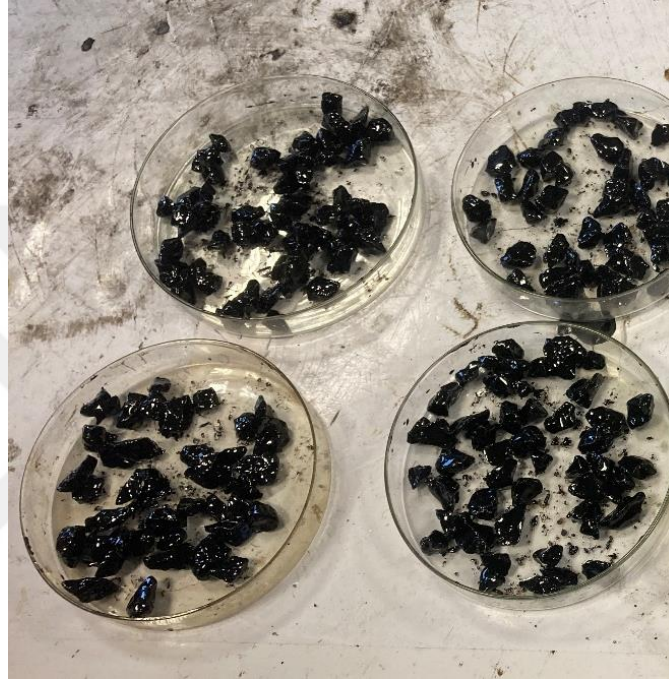
Pen_{25} = 25 °C'deki Penetrasyon Değerini

SP= Modifiye Bitümün Yumuşama Noktası Değeri

3.4.13 Nicholson Soyulma Deneyi

Atmosferik etkiler ve trafik yükleri bitümlü karışımlar içerisindeki agrega adezyonun azalmasına neden olur. Adezyon azaldıkça agrega yüzeyini saran bitüm soyulmaya başlar. Nicholson soyulma deneyi TS EN 12697-11 standardına göre yapılmaktadır. Bu deneyle agrega ile bitüm arasında oluşan adezyon ve bu adezyonun soyulmaya karşı etkisi belirlenir. Deney için 3/8" – No 4 elekleri arasında kalan yıkanmış ve kurutulmuş 100 gram agrega alınır. Bu agregalar daha sonra deney numunesini hazırlamak üzere 150°C sıcaklıktaki etüvde en az 1 saat ısıtılır. Etüvden çıkarılan sıcak

agrega üzerine 5 gram ısıtılmış bitüm eklenir ve bütün agregaların yüzeyi bitümle kaplanacak şekilde karıştırılır. Bir beher içerisinde hazırlanan numuneler 60°C sıcaklıkta 24 saat bekleyecek şekilde etüve yerleştirilir. 24 saat sonundan etüvden çıkarılan numuneler 10 cm çapındaki petri kaplarına aktarılır ve petri kapları su ile doldurulur. Sonraki aşamada kalıplar kapatılarak 60°C sıcaklıktaki etüve 24 saat bekletilmek üzere yerleştirilir. Süre tamamlandıktan kaplardaki sular boşaltılır ve yeniden su doldurulur. En son aşamada numunelere ışık tutularak agregaların yüzeylerinin ne kadarının bitümle kaplı olduğu gözlemsel olarak tespit edilir. Şekil 3.16'da Nicholson soyulma deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.16. Nicholson soyulma deney numuneleri

3.4.14. Vialit Yöntemi ile Yapışma Deneyi

Vialit Yöntemi ile Yapışma TS EN 12272-3 standardına göre yapılmaktadır. Bu deney sathi kaplamalı yollarda kullanılan agregat – bağlayıcı arasındaki adezyonun belirlenmesi amacıyla yapılır. Deneye başlamadan önce plakalar temizlenerek kurutulmalıdır. Deneyde kullanılacak agregatlar elenip yıkanarak 24 saat etüvde kurutulduktan sonra deneyde kullanılmaktadır. Agregat üzerinde oluşabilecek toz, nem vb. adezyonu olumsuz etkileyebilecek durumların önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Püskürtme sıcaklığına ulaşmış olan bitümlü bağlayıcı gereken miktarda tartılarak plaka üzerine uniform olacak şekilde yüzeye uygulanmaktadır. Bağlayıcının uniform olması için plaka 150 °C'ye kadar ısıtılır. Numunelerin üzerinden lastik bantlı silindireme ile üç defa bir yönde üç defa diğer yönden dik olarak toplamda altı defa silindirajla sıkıştırılır. Aynı deney koşullarında üç ölçüm değeri elde etmek için üç farklı plaka silindirajla sıkıştırılır. Yapılan deneyler sonucunda bitümden ayrılan/düşen agregat sayısı toplam agregatın sayısının yüzdesi olarak hesaplanır. Deney sonucunda her bir numune için ortaya çıkan

yüzdenin Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesine (KTS 2023) göre ≤ 10 'a olması gerekir (www.kgm.gov.tr., 2023). Şekil 3.17'de vialit yöntemi deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.17. Vialit yöntemi deney numuneleri

3.4.15 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, deney numunelerinin üzerine odaklanmış elektron demeti göndererek numune yüzeyini tarayan ve numunelerin çok küçük boyutlardaki yüzey görüntülerini ayrıntılı bir şekilde görünmesini sağlayan bir mikroskop türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili dedektörlerce toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ile ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin performansının araştırılması amacıyla yapılan XRF analizi, özgül ağırlık, yanma-parlama, penetrasyon, yumuşama noktası, depolama stabilitesi, duktilite, dinamik kesme reometresi (DSR), dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kırıç eğilme reometresi (BBR), kuvvet ölçümlü duktilite, elastik geri dönme, nicholson soyulma ve vialit yapışma deneylerinin sonuçları bu bölümde detaylı olarak değerlendirilmiştir.

4.1 X- Işınları Floresan Spektroskopisi (XRF)

Tez çalışmasında kullanılan atık kuvars kumunun moleküler bileşiminin belirlenebilmesi amacıyla Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM), numuneler üzerinde yapılan XRF analiz sonuçları Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1. X-Işınları floresan spektroskopisi (XRF) analizi

Element	Yüzdesi (%)
SiO ₂	68,194
Al ₂ O ₃	12,004
K ₂ O	5,989
A.Z.*	5,521
CaO	4,585
MgO	1,673
Fe ₂ O ₃	0,733
TiO ₂	0,623
P ₂ O ₅	0,185
F	0,161
Na ₂ O	0,088
ZrO ₂	0,075
SO ₃	0,053
BaO	0,03
Cl	0,026
MnO	0,014
Cr ₂ O ₃	0,013
SrO	0,01
Rb ₂ O	0,007
ZnO	0,005
PbO	0,004
NiO	0,003
Y ₂ O ₃	0,003
Nb ₂ O ₅	0,001

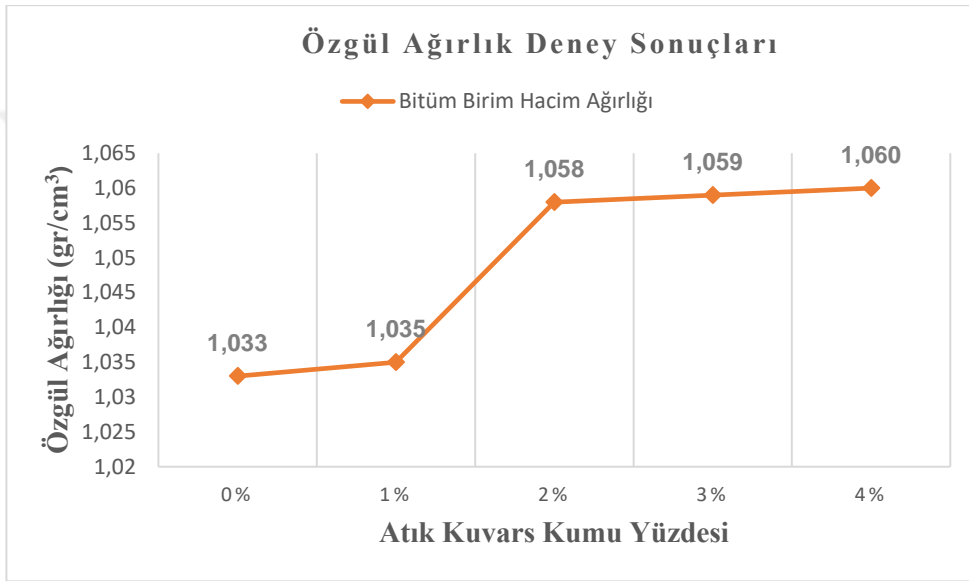
*Not: A.Z.: ateş zaiyatı

Tablo 4.1 incelendiğinde atık kuvars içerisinde çevreye ve insan sağlığına zarar verebilecek tehlikeli bileşenlerin olmadığı görülmektedir. XRF sonuçlarına göre atık kuvars kumu içerisinde

beklenildiği gibi yüksek miktarda silis bileşikleri bulunmaktadır. Bu analizden elde edilen sonuçlara göre kimyasal yapı açısından atık kuvars kumunun kullanımında herhangi bir sakınca olmadığı tespit edilmiştir.

4.2. Özgül Ağırlık Tayini Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numuneler TS EN 58'e göre alınmış ve TS EN 12598'e göre hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda özgül ağırlık deney sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.

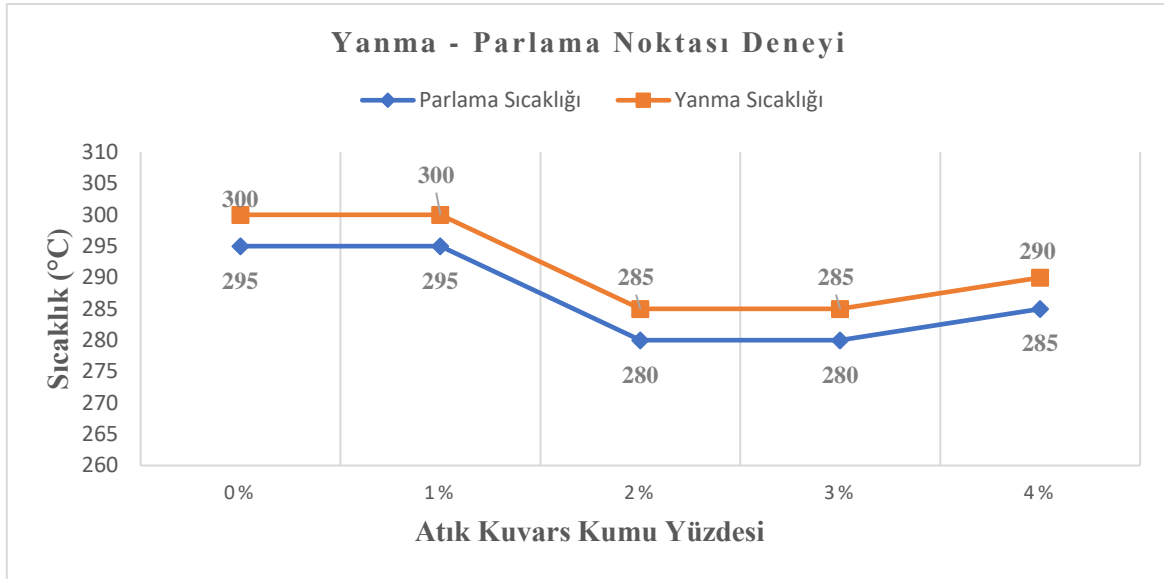


Şekil 4.1. Özgül ağırlık deney sonuçları

Atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümün özgül ağırlık sonuçları atık kuvars kumu arttıkça özgül ağırlığının arttığı tespit edilmiştir. B50/70 saf bitüme göre %4 oranında yaklaşık %3 artış meydana gelmiştir.

4.3. Yanma- Parlama Noktası Deneyi

Saf bitüm numunesi ve modifiye bitüm numunelerine yapılan yanma-parlama noktası deneylerinin sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.

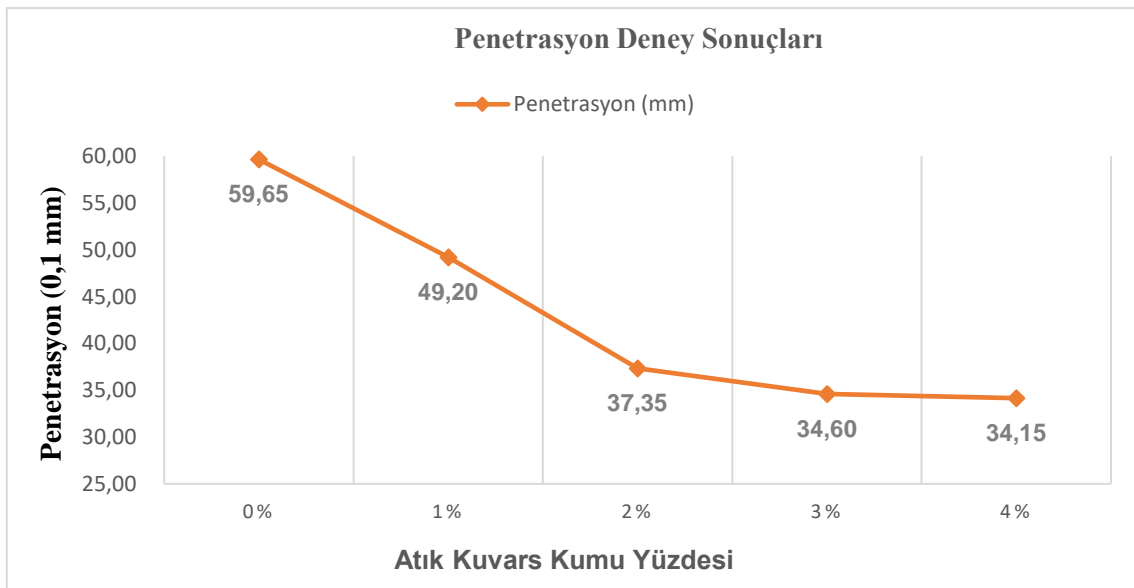


Şekil 4.2. Yanma-parlama noktası deney sonuçları

Yanma noktası sonuçlarında saf bitüm ile %1 oranında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş bitümün aynı sıcaklıklarda parlama ve yanmasının gerçekleştiği görülmektedir. %2 ile %3 modifiye numunelerin %5, %4 numunede ise yaklaşık %4 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Karayolu Teknik Şartnamesinde (2023) parlama noktası sınır değerinin ≥ 230 °C'den büyük olması yer almakta olup tüm deney sonuçları sınır değerinin üzerinde olduğu görülmektedir.

4.4. Penetrasyon Deneyi

Hazırlanan bağlayıcı numunelerine yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçları Şekil 4.3'de verilmiştir.



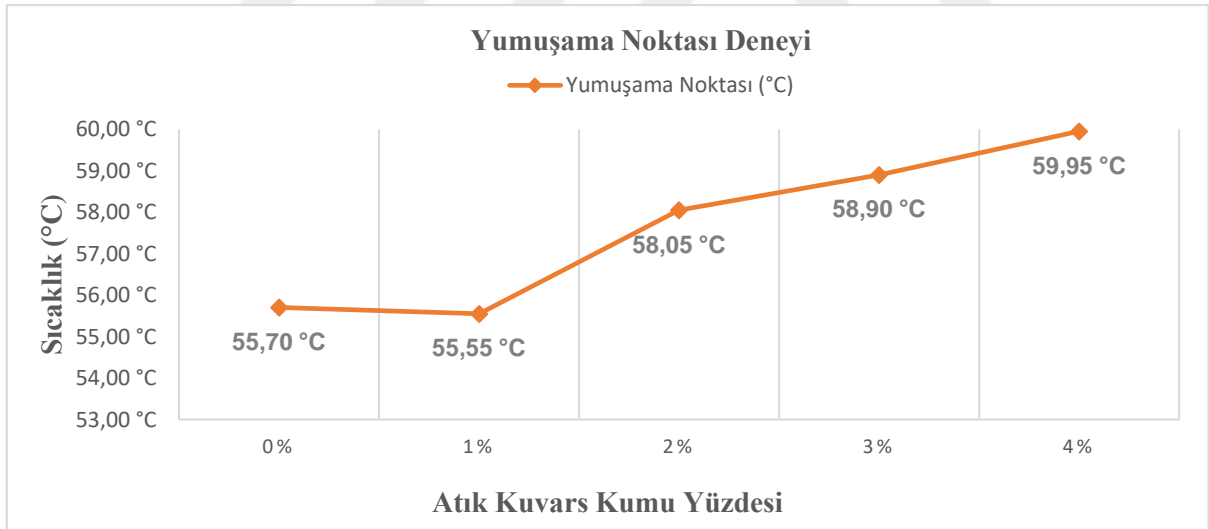
Şekil 4.3. Penetrasyon deney sonuçları

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi farklı oranlarda atık kuvars kumu ilave edilerek modifiye edilen bitümlerin penetrasyon değeri düşmüştür. Yani bitümlü bağlayıcıların kıvamı sertleşmiştir. Atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümün doğrusal bir şekilde kıvamının sertleşmesi ile sıcak iklimlerde kullanılabilme/uygulanabilme imkanı artmaktadır. Penetrasyon kıvamının sertleşmesi ile bitümün işlenebilirliği ve sahada uygulanabilirliği güçleşmektedir. Penetrasyon değerindeki en fazla azalma ağırlıkça %4 oranında modifiye edilen atık kuvars kumunda yaklaşık olarak %43 olarak ölçülmüştür.

4.5. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyinin sonuçları bitümlü bağlayıcıların kullanılabileceği iklimlerdeki bölgeler hakkında bir fikir vermektedir (Öz Kıcı & Saltan, 2020).

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin yumuşama noktası TS EN 1427 ve ASTM-D36 standartlarına uygun olarak deneyleri yapılmıştır. Yumuşama noktası deneyinde cihazında iki yüzük üzerinde bulunan bilyenin yere değmesi sonucunda değerlerin ortalaması alınarak sonuç ortaya çıkarılmıştır. Şekil 4.4’de yapılan yumuşama noktası deneylerinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.4. Yumuşama noktası deney sonuçları

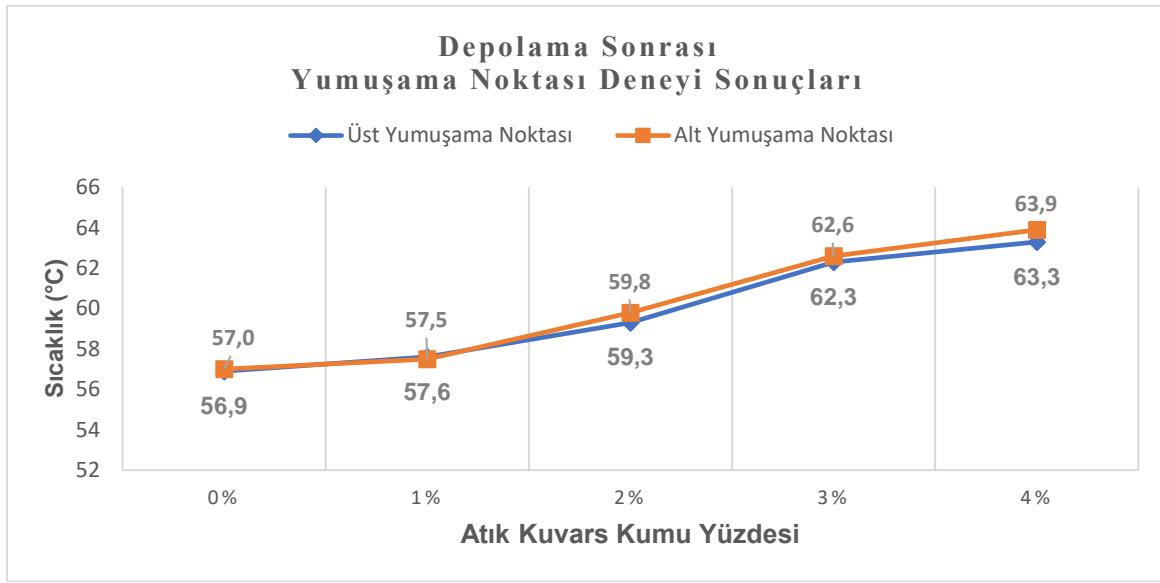
Elde edilen sonuçlara göre %1 oranında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş bağlayıcının yumuşama noktası değerinin %0,03 oranında düştüğü tespit edilmiştir.

%2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu eklenerek hazırlanan modifiye bitümlerin yumuşama noktası sıcaklıklarının ise saf bitümün yumuşama noktası sıcaklığına göre sırasıyla %4, %6 ve %8 oranlarında arttığı yani bağlayıcının sertleştiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar

doğrultusunda atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların sıcak iklimlerde kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

4.6. Depolama Stabilitesi Deneyi

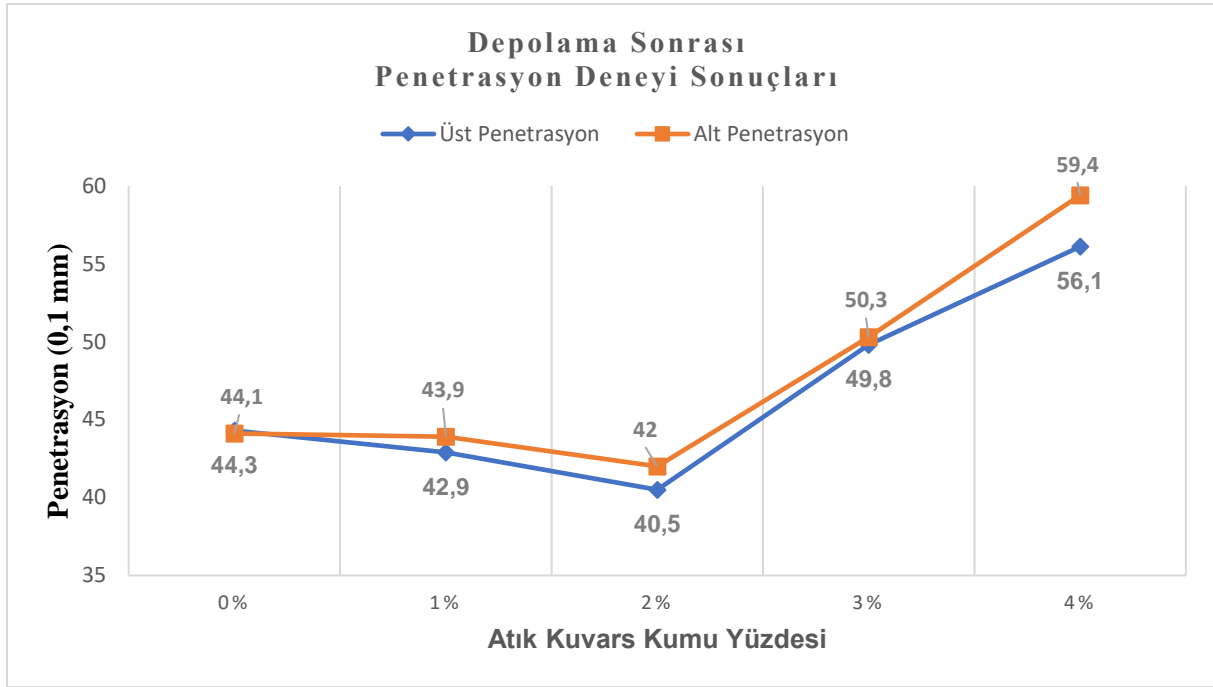
Hazırlanan saf ve modifiye bitüm numunelerine depolama sonrasında yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.5’de depolama sonrasında yapılan yumuşama noktası deneylerinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.5. Depolama stabilitesi deney sonuçları

Şekil 4.5’de deney sonuçları incelendiğinde, depolama stabilitesinin alt ve üst yumuşama noktası değerine göre en yüksek yumuşama noktası değeri ağırlıkça %4 oranında eklenen atık kuvars kumu modifikasyonunun sahip olduğu belirlenmiştir. Depolama stabilitesi sonrasında alt ve üst parçaların yumuşama noktası değerlerinin birbirine yakın olduğu dolayısıyla düşük oranlardaki atık kuvars kumu modifikasyonlarının depolanmadan fazla etkilenmediği tespit edilmiştir. Depolama stabilitesi değerinden en çok etkilenen ağırlıkça %2 oranında atık kuvars kumu ile modifiye edilen numune 0,5 °C’de fark oluşmuştur. B 50/70 penetrasyonlu saf bitüm ile atık kuvars kumun homojen bir şekilde karıştığı belirlenmiştir. Yumuşama noktası deneyleri sonucunda depolama açısından en uygun numunenin ağırlıkça %1 oranında eklenen atık kuvars kumu modifikasyonunun 0,1°C farkı oluşturduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.6.’da depolama sonrasında yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçları görülmektedir.

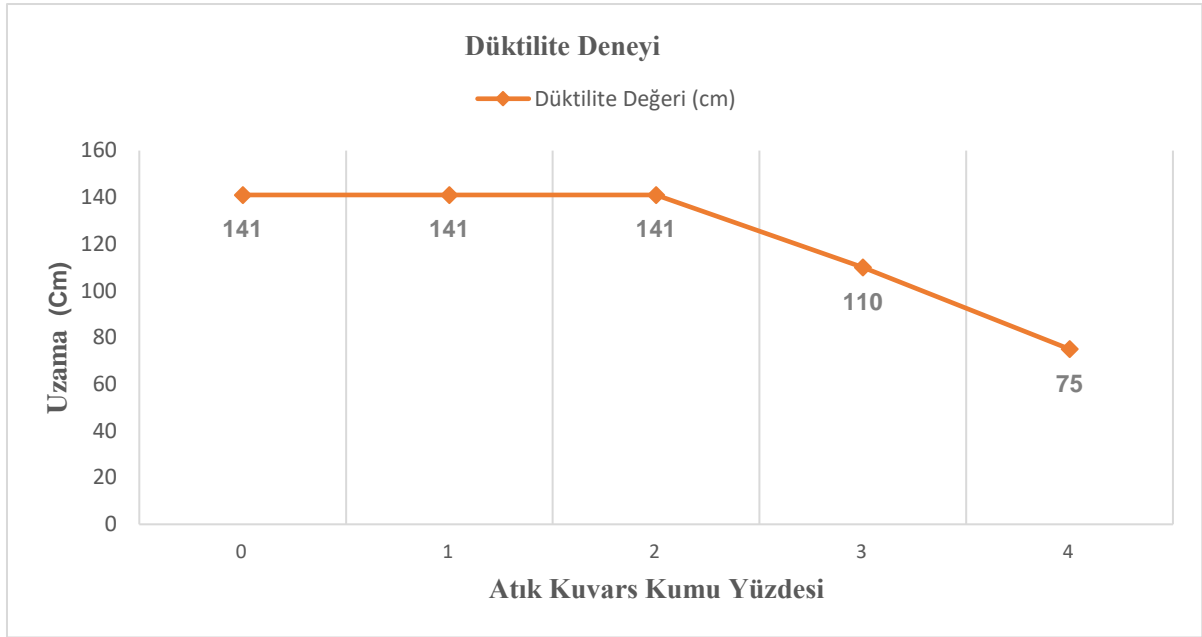


Şekil 4.6. Depolama sonrası kalıcı penetrasyon sonuçları

Depolama stabilitesi sonrası yapılan penetrasyon deney sonuçları incelendiğinde %1 ve %2 oranlarında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş numunelerin saf bitüme göre penetrasyon değerlerinde düşüş olduğu yani bağlayıcının kıvamının az bir miktarda sertleştiği tespit edilmiştir. Ancak %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş numunelerin penetrasyon değerlerinde artışa bağlı olarak bağlayıcının kıvamının bir miktar yumuşadığı tespit edilmiştir. Depolama sonrası yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçları bir arada değerlendirildiğinde üretilen modifiye bitümlerin hepsinin B50/70 penetrasyon derecesini aşmadığı tespit edilmiştir.

4.7. Düktilite Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin düktilite deney sonuçları Şekil 4.7'de görülmektedir.

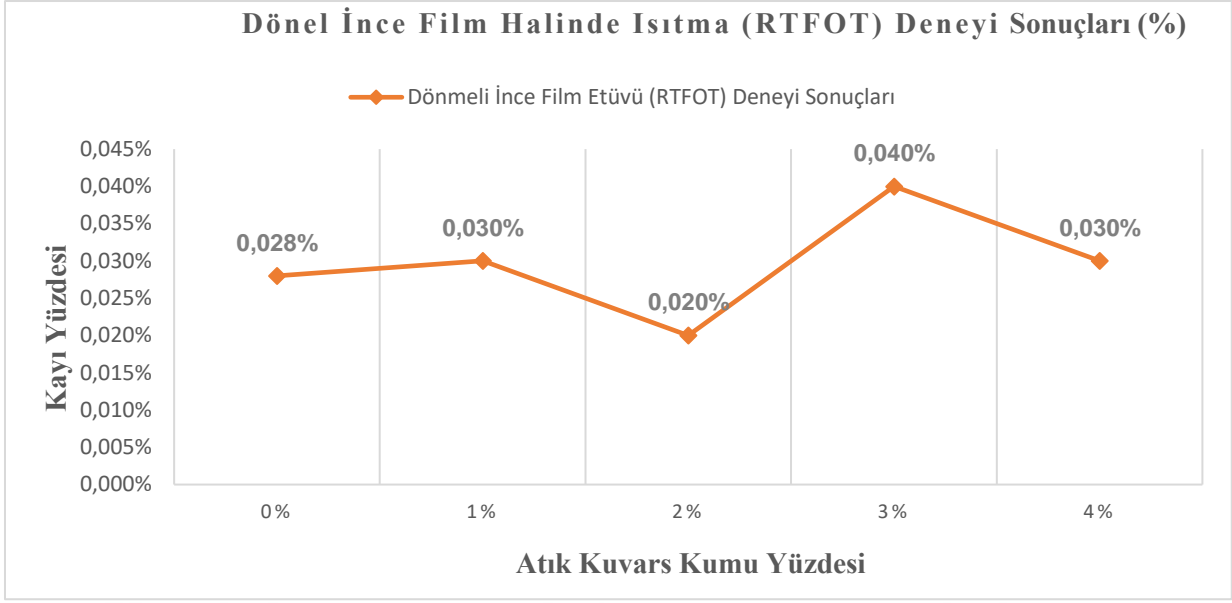


Şekil 4.7. Düktilite deney sonuçları

Şekil 4.7’de verilen deney sonuçlarına göre saf bitüm ve ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında atık kuvars kumu eklenerek hazırlanan modifiye bağlayıcıların uzama miktarının aynı olduğu görülmektedir. Ancak %3 ve %%4 oranlarında atık malzeme eklenerek üretilen modifiye bağlayıcıların düktilite değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen düktilite deney sonuçları bir arada değerlendirildiğinde saf B50/70 bitüme ağırlıkça %2’den daha fazla atık kuvars kumu eklemenin bağlayıcının esneklik özelliğini azalttığı tespit edilmiştir. Bitümün %1 ve %2 oranlarının uzama kabiliyeti %3 ve %4 değerlerine göre daha fazladır. Ancak düktilite değeri yüksek olan %1 ve %2 oranlarının bitümleri ise ısı değişimlerine duyarlılıkları daha fazladır.

4.8. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %%4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin RTFOT deney sonuçları Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deney sonuçları

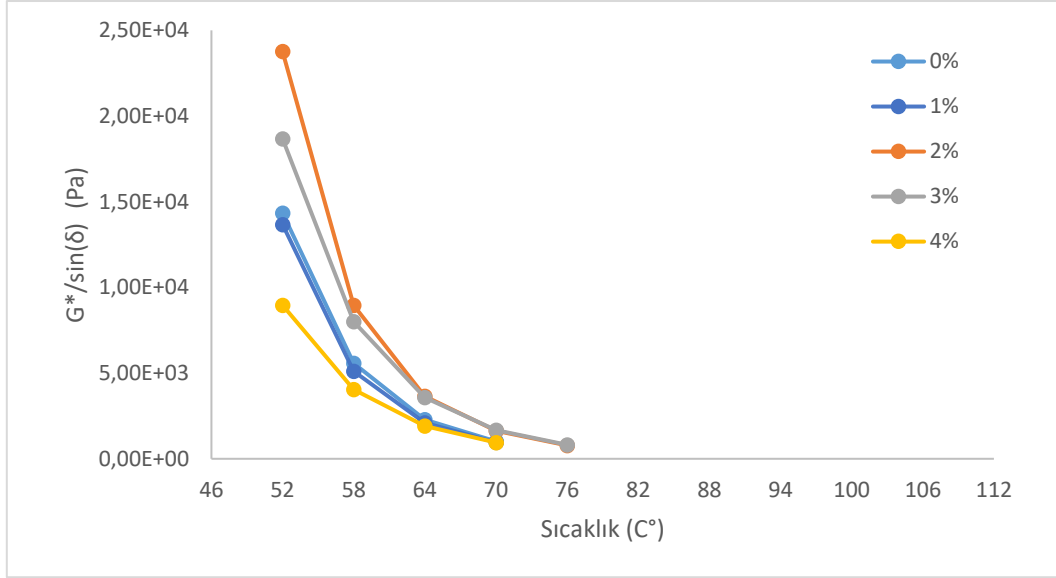
B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve modifiye bitüm numuneleri incelendiğinde kütle kayıplarının Karayolu Teknik Şartname sınır değeri %1'in altında olduğu görülmektedir. %1, %3 ve %4 oranlarında atık katkısı ile modifiye edilen numunelerde kütle kayıp miktarlarının saf bitüme göre daha fazla olduğu, %2 oranında atık katkısı ile modifiye edilen numune de ise saf bitüme göre kayıp oranı daha az olduğu görülmektedir. En fazla kütle kaybı %3 atık katkılı modifiye bitümde olduğu ve saf bitüme göre %43 daha fazla kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.8'e göre atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş numunelerin kısa dönem yaşlanmaya karşı direncinin arttığı tespit edilmiştir.

4.9. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ile modifiye bitüm numuneleri herhangi bir yaşlandırmaya maruz bırakılmadan dinamik kesme reometresi (DSR) deneyine tabi tutulmuştur. Polimer modifiye bitüm şartnamesindeki sınırlar gözetilerek DSR deneylerinde başlangıç sıcaklığı 52°C olarak belirlenmiştir.

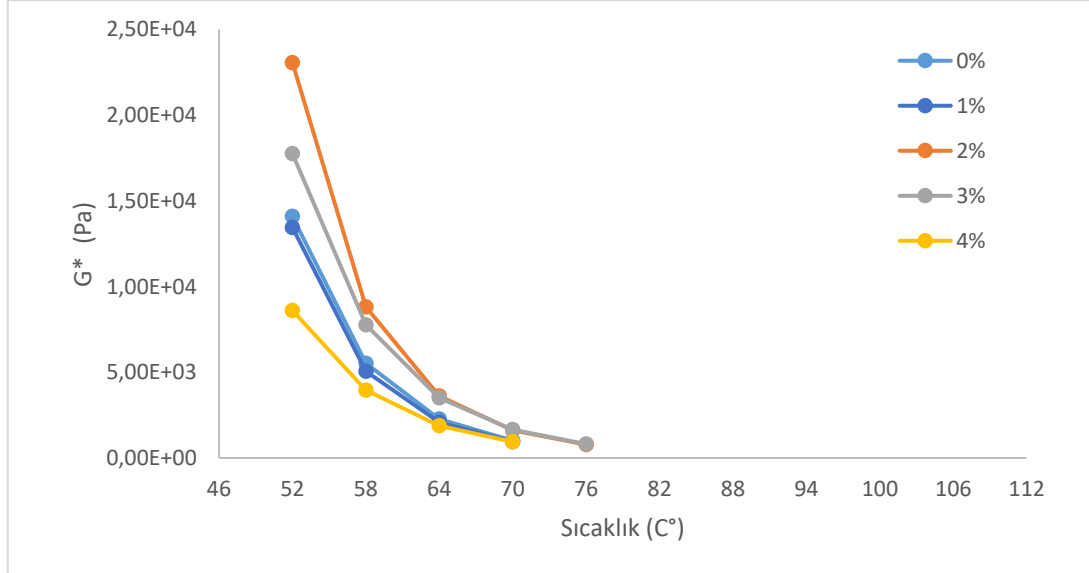
Saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numuneler Dinamik Kesme (DSR) Deneyi ile numunelerin kompleks modülü (G^*) ve faz açısının (δ) belirlenmesi ile viskoz ve elastik davranışı gözlemlenmiştir.

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve katkı oranı %1 ve %4 olan bağlayıcılar için yapılan deneyler 4. adım olan 70°C sıcaklıkta sonlanmıştır. Modifiye bitümler arasında katkı oranı %2 ve %3 olan bağlayıcı numunelerine yapılan deneyler ise 5. adım olan 76°C sıcaklıkta sonlanmıştır. Yaşlandırılmamış bağlayıcı numunelerine yapılan DSR deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi $G^*/\sin\delta$, Pa parametresinin değişimi

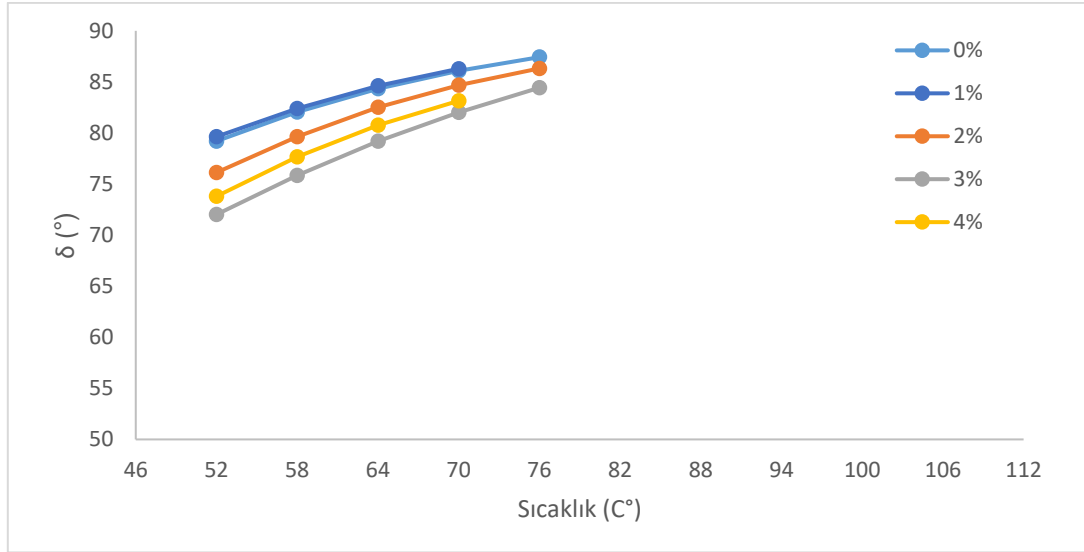
Şekil 4.9 incelendiğinde $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi parametresine ait değerlerin yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümler için sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Saf bitüm, %1 ve %4 atık katkı modifiye bitümler için $G^*/\sin\delta$ değerinin şartname sınırı olan 1 kPa'la düştüğü sıcaklık 70°C olarak ölçülürken, %2 ve %3 atık katkı modifiye bitümler için 76 °C'de şartname sınır değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.10. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi G^* (Pa) parametresinin değişimi

Şekil 4.10 incelendiğinde kompleks kesme modülü parametresine ait değerlerin yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümler için sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. %2 ve %3 atık katkı modifiye bitüm numunelerinin G^* değerleri B50/70 penetrasyonlu saf bitüme göre daha yüksek olduğu, %2 ve %3 atık katkı modifiye bitümlerin deformasyona karşı direncini arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan %1 atık katkı modifiye bağlayıcının B50/70 penetrasyonlu saf bitümle benzer davranış

gösterdiği, %4 atık katkılı modifiye bağlayıcının ise B50/70 penetrasyonlu saf bitümden daha düşük kompleks modülü değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.



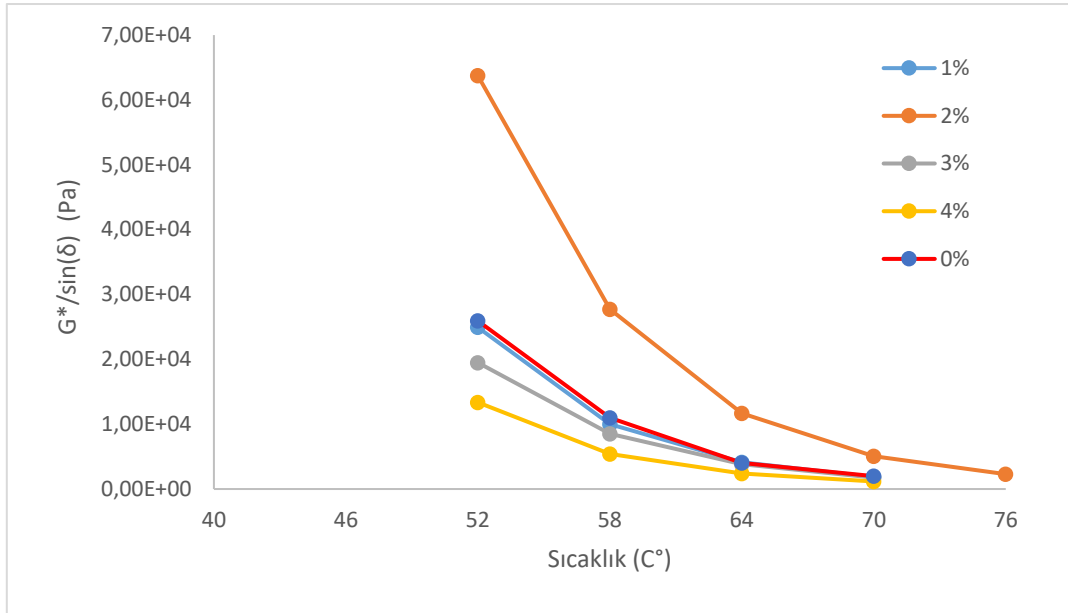
Şekil 4.11. Modifiye bitümlerin yaşlanma öncesi δ (°) parametresinin değişimi

Yaşlandırılmamış bağlayıcı numunelerine uygulanan DSR deneylerinden elde edilen faz açısı değerleri Şekil 4.11'de görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte faz açısının bütün numuneler için 90° 'ye yaklaştığı görülmektedir. Sıcaklığın artması sonucunda numunelerin viskoz davranış gösterdiği görülmektedir. Modifiye bitüm numunelerinin tamamında orijinal bitüme göre faz açısı değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre saf bitüm numunesinin modifiye bitüm numunelerine kıyasla daha viskoz davrandığı tespit edilmiştir.

4.10. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Dinamik Kesme (DSR) Deneyi Sonuçları

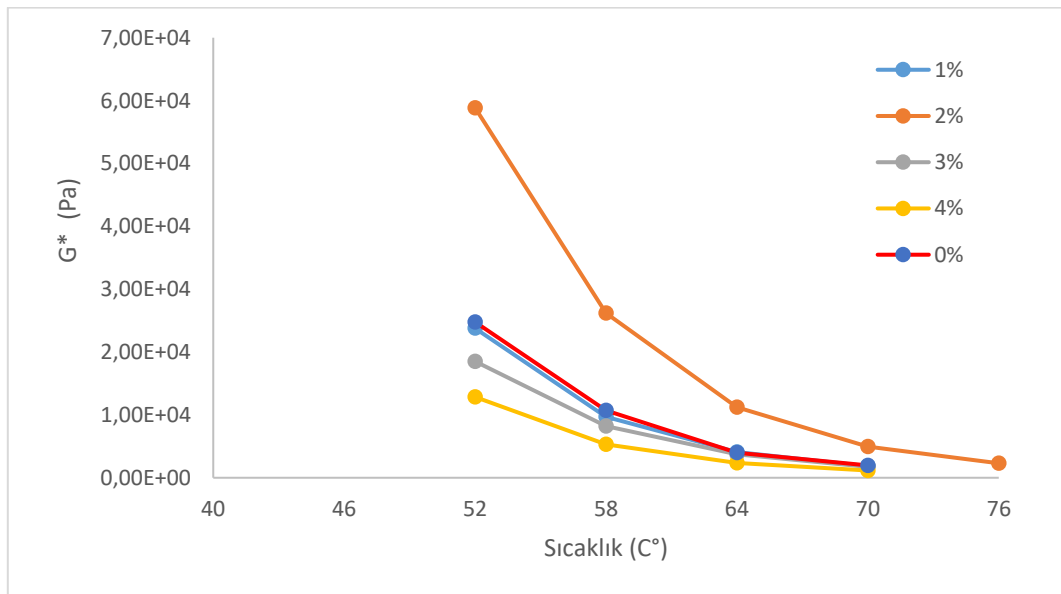
RTFOT testleri sonrasında saf bitüm ve modifiye bitüm numuneleri DSR deneyine tabi tutulmuştur sonuçları Şekil 4.12, Şekil 4.13. ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcı numuneleri üzerinde yapılan DSR testlerine başlangıç sıcaklığı yine 52°C olarak seçilmiştir. Bu deney ile uzun dönem yaşlandırmadan önceki yorulma değerinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır.

B50/70 penetrasyonlu saf bitümün yenilme sıcaklığı yüksek iken atık kuvars kumu ile modifiye numunelerin değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Kısa Dönem yaşlandırma sonrası yapılan bitüm numuneleri üzerinde yapılan deneylerde %1, %2, %3 ve %4 modifiye bitümlerin 52°C , B50/70 penetrasyonlu bitümün ise 64°C sıcaklıktan başlatılmıştır.



Şekil 4.12. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası $G^*/\sin\delta$, Pa

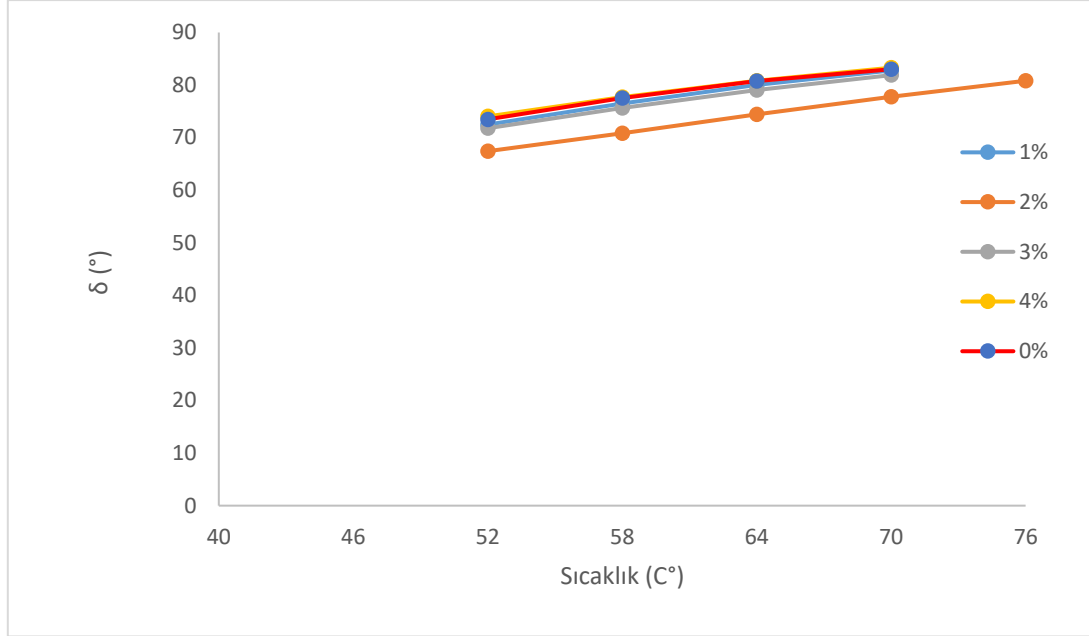
Şekil 4.12.'de kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde sıcaklığın artmasıyla tüm numunelerin tekerlek izi oluşumuna karşı direnç anlamına gelen $G^*/\sin\delta$ değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. B50/70 penetrasyonlu bitüm, %1, %2, %3 ve %4 atık katkıli modifiye bitümler için $G^*/\sin\delta$ değerinin şartnameye göre 2,2 kPa olduğu sıcaklık değeri B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve %1, %3 ve %4 atık katkıli modifiye bağlayıcı için 70°C, %2 atık katkıli modifiye bağlayıcı için ise 76 °C, ölçüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası G^* (Pa)

Şekil 4.13.'de kompleks kesme modülü parametresine ait sonuçlar B50/70 saf bitüm ve modifiye bitümler için sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Kısa dönem yaşlandırılmış %2 atık

katkılı modifiye bitüm numunesi için G^* değerlerinin saf bitüme göre daha yüksek olduğu, kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcının deformasyona karşı direncinin arttığı değerlendirilmektedir. %1 atık katkılı modifiye bitüm katkısız saf bitüm ile benzer davranış gösterirken %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitümlerde kesme modülü değerinin B50/70 penetrasyonlu bitüme göre düşük olduğu tespit edilmiştir.

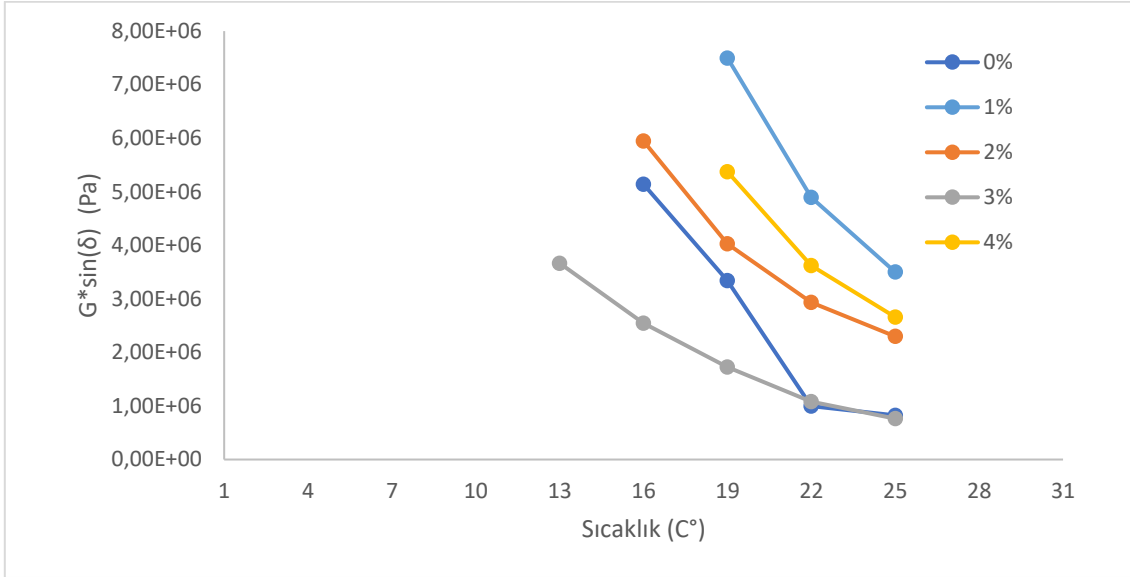


Şekil 4.14. Saf bitüm ile modifiye bitüm kısa dönem yaşlanma sonrası δ (°)

Şekil 4.14.'de DSR testlerinde kısa dönem yaşlandırılmış B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ile %1, %2, %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitümlerin sıcaklık arttıkça faz açısı değişimlerinin birbirine benzer olduğu, numunelerin yük altında viskoza yakın davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

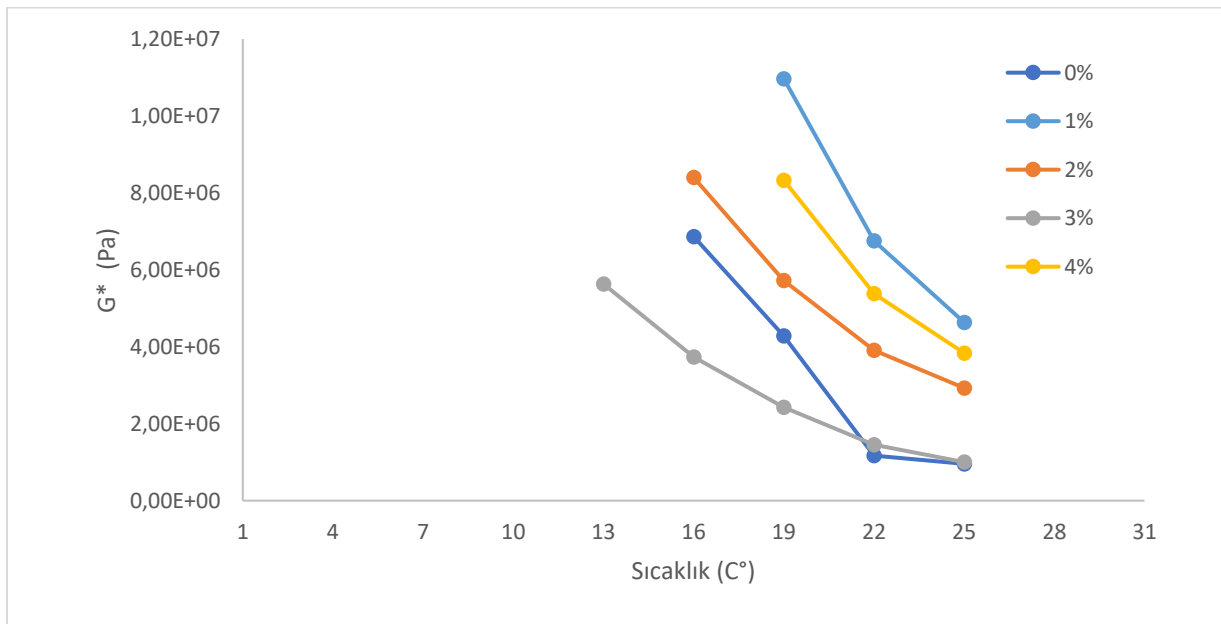
4.11. PAV Deneyi Sonrası Yapılan Dinamik Kesme (DSR) Deneyi Sonuçları

Hazırlanan bağlayıcı numuneleri üzerinde PAV yaşlandırması sonrasında yapılan DSR testlerinin sonuçları Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Bu deneyler başlangıç sıcaklığı olarak 25°C seçilmiştir.



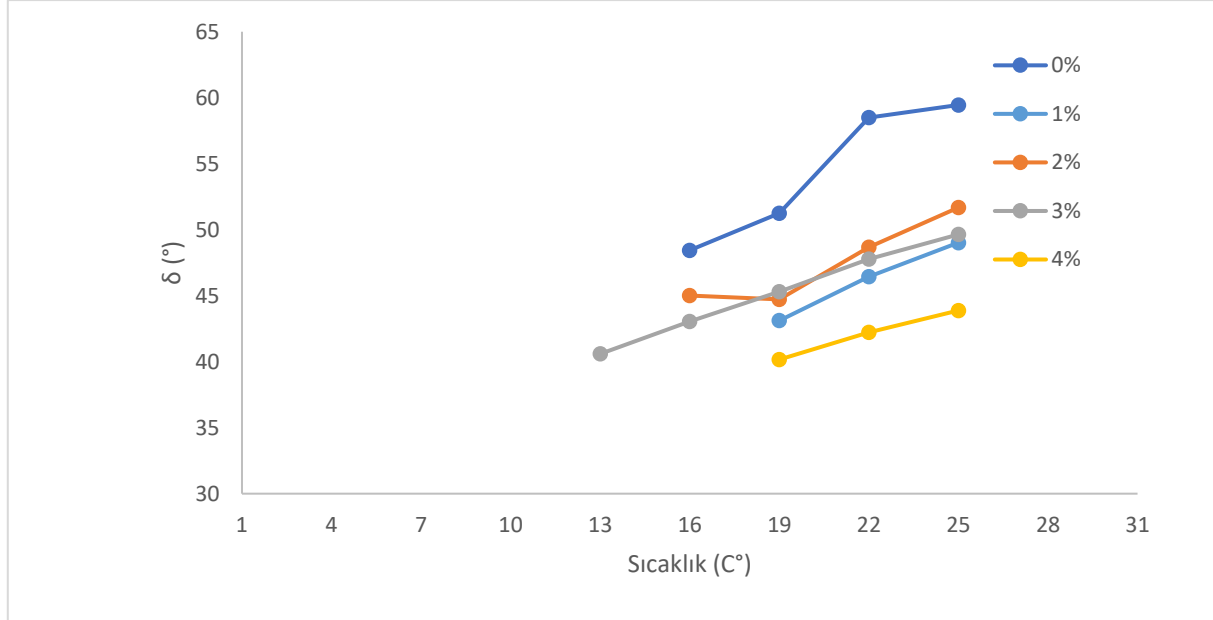
Şekil 4.15. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası $G^*/\sin(\delta)$ parametresinin değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde $G^*\sin\delta$ yorulma parametresine ait değerlerin uzun dönem yaşlandırma sonrası B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve modifiye bitümler için sıcaklığın azalmasıyla tüm numunelerin yorulma çatlak oluşumuna karşı direnç anlamına gelen $G^*\sin\delta$ değerlerinde azalış olduğu görülmektedir. Uzun dönem yaşlandırılmış saf bitüm ve %2 atık katkıli modifiye numuneler için yorulma parametresinin 5000 kPa'nın aştığı, sıcaklık değeri 16°C olarak okunurken %1 ve %4 atık katkıli modifiye bitüm numunesi için bu değer 19°C olarak okunmuştur. %3 atık katkıli modifiye bitüm numunesinde ise yenilme sıcaklığının 13°C olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.16. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası G^* (Pa) parametresinin değişimi

Şekil 4.16'da verilen uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerinin kesme modülü parametreleri incelendiğinde ise bu değerlerin Şekil 4.15'de verilen $G^*/\sin\delta$ parametresine ait grafiklerle benzer şekilde değiştiği görülmektedir.

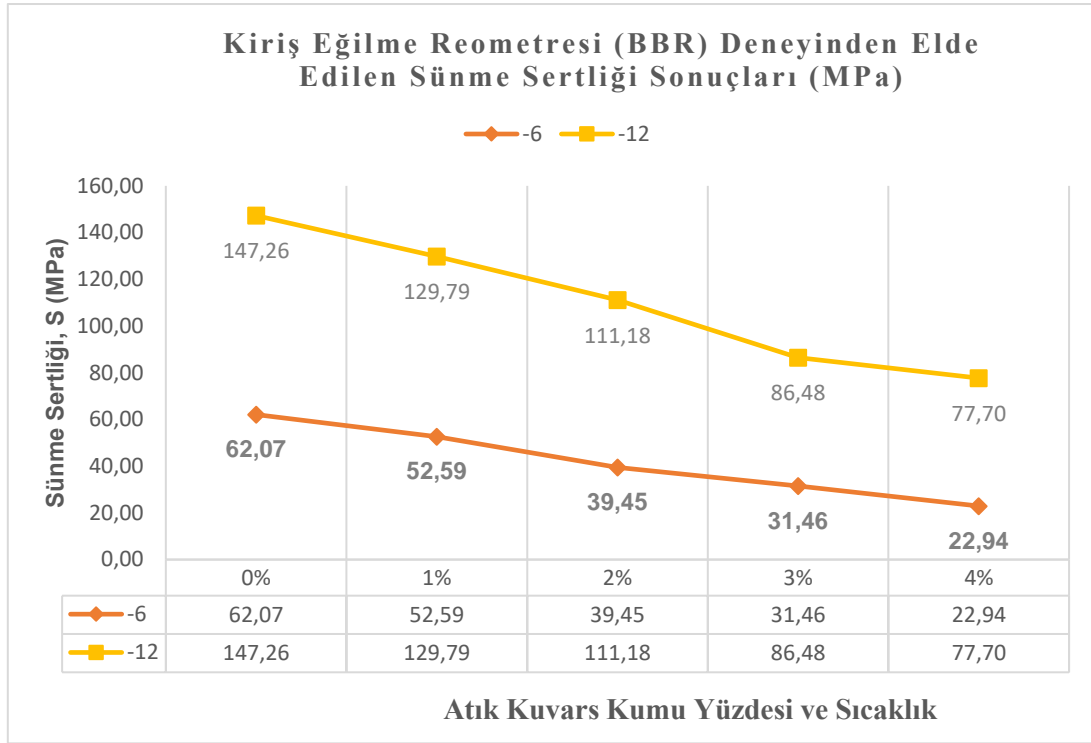


Şekil 4.17. Bitüm numuneleri için uzun dönem yaşlandırma sonrası δ (°) parametresinin değişimi

Şekil 4.17 incelendiğinde, uzun dönem yaşlandırılmış B50/70 penetrasyonlu bitüm, %1, %2, %3 ve %4 modifiye bitümler için yenilme sıcaklığında faz açısının (δ) düştüğü, dolayısıyla numunelerin düşük sıcaklıklarda yük altında daha elastik davranış gösterdiği tespit edilmiştir. En düşük yenilme sıcaklığı 13°C olarak %3 atık katkıli modifiye bitüm numunesi için elde edilmiştir.

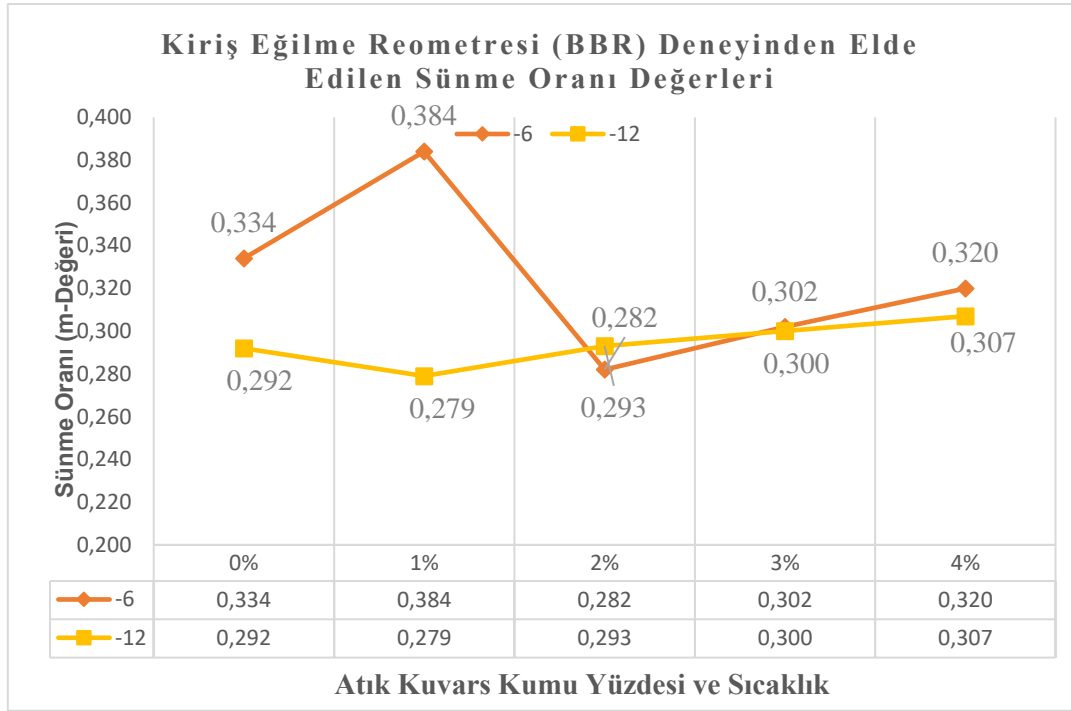
4.12. Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık katkıli modifiye bitüm numuneleri -6 °C -12 °C olmak üzere iki deney sıcaklığında BBR testine tabi tutulmuş ve sonuçları Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. BBR deneyinden elde edilen sünme sertliği sonuçları

B50/70 penetrasyonlu saf bitüme göre en düşük sünme sertliği %4 oranında atık ile modifiye edilmiş bağlayıcı numunesi için elde edilmiştir. Sünme sertliği için şartname limiti olan maksimumu 300 MPa ($S \leq 300$ MPa) değerini -6°C ve -12°C sıcaklıklarda B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu katkısı ile modifiye edilen numunelerin tamamının sağladığı tespit edilmiştir.



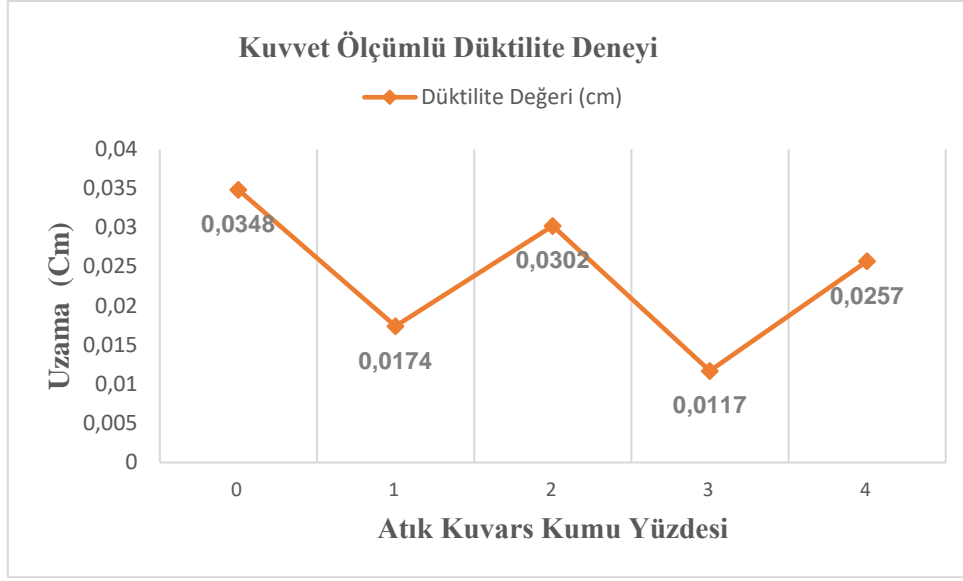
Şekil 4.19. BBR deneyinden elde edilen sünme oranı değerleri

Şekil 4.19.'da bağlayıcı numuneleri için yapılan BBR testleri sonucunda elde edilen sünme oranları (m-değeri) değerleri değişimi görülmektedir. Şekilde 4.19'da görüldüğü gibi şartname sınır değerini ($m \geq 0,300$) -6°C 'de %2 atık katkılı modifiye bitüm numunesi dışında bütün numunelerin sağladığı görülmektedir. -6°C 'de şartname sınır değerlerini sağlayan bağlayıcı numuneleri arasında %1 atık katkılı modifiye bitüm numunesi için katkısız bağlayıcıya göre daha yüksek sünme oranı değeri elde edilmiştir. Ancak %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitüm numuneleri için belirlenen sünme oranı saf bitüm için belirlenen değerden daha düşüktür.

-12°C 'de yapılan BBR deneylerinde ise şartnamede belirtilen sünme oranı sınır değerini yalnızca %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitüm numuneleri sağlamıştır. -12°C 'da yapılan BBR deneylerinde %2, %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitümler için belirlenen sünme oranı değerleri saf bitüme göre daha yüksektir.

4.13. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyleri

Bağlayıcı numuneleri için yapılan kuvvet ölçümlü düktilite deneylerinin sonuçları Şekil 4.20'de gösterilmektedir.

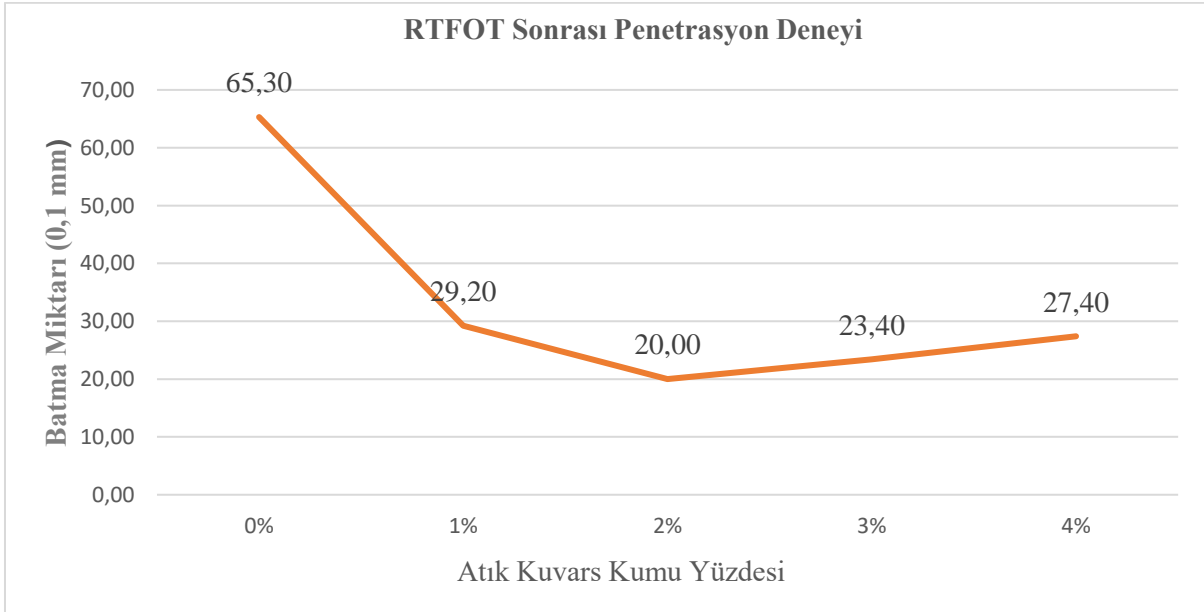


Şekil 4.20. Kuvvet ölçümlü düktilite deney sonuçları

B50/70 penetrasyonlu bitüm ile modifiye bitüm numunelerinin kuvvet ölçümlü düktilite deney sonuçları incelendiğinde sonuçların tamamının Karayolu Teknik Şartname (2023) sınır değeri olan $\geq 0,5$ j/cm² değerlerini sağlamadığı görülmektedir.

4.14. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Penetrasyon Deneyi Sonuçları

B50/70 saf bitüm ile ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık katkıli modifiye bitüm numuneleri üzerinde RTFOT yöntemiyle yaşlandırma sonrasında yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçları Şekil 4.21'de gösterilmiştir.

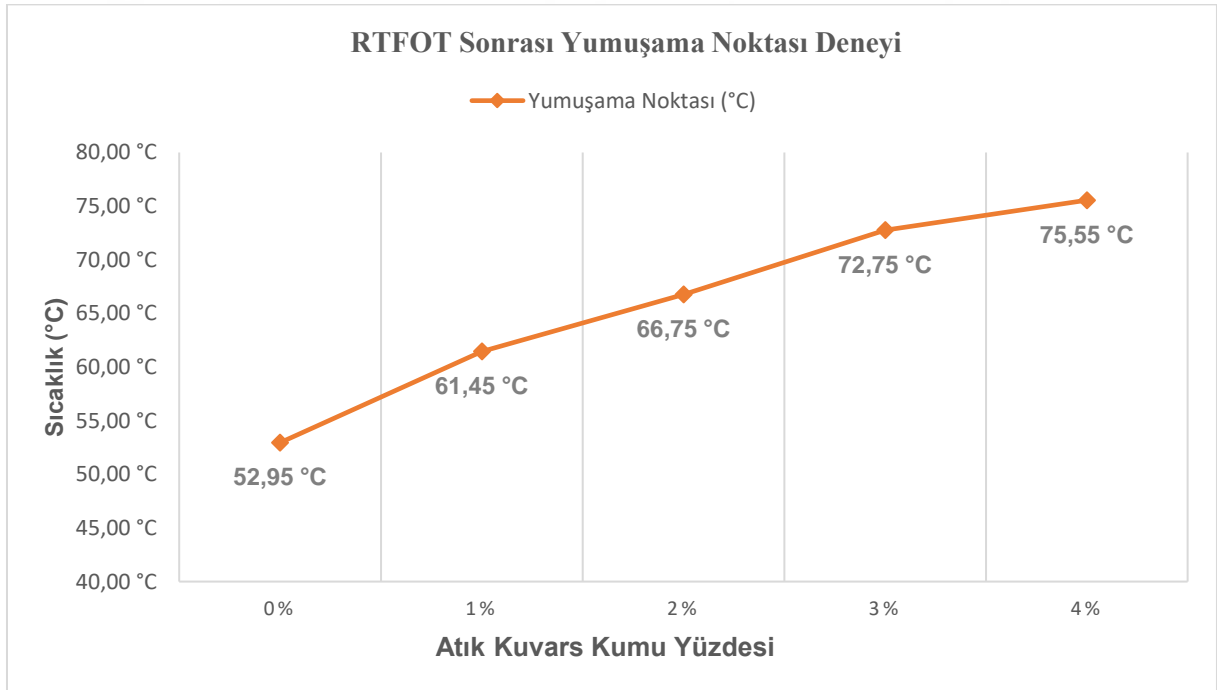


Şekil 4.21. RTFOT deneyi sonrasında yapılan penetrasyon deneyi sonuçları

Şekil 4.22'ye göre modifiye bitüm numuneleri üzerinde RTFOT deneyi sonrasında yapılan penetrasyon deneylerinden elde edilen penetrasyon değerlerinin saf bitüm göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre modifiye bitümlü bağlayıcıların kıvamı sertleşmiştir. Penetrasyon değerleri arasındaki en büyük düşüş (%70) %2 oranında atık katkısı ile modifiye edilen bağlayıcı için tespit edilmiştir.

4.15. RTFOT Deneyi Sonrası Yapılan Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

B50/70 saf bitüm ile ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık katkılı modifiye bitüm numuneleri üzerinde RTFOT yöntemiyle yaşlandırma sonrasında yapılan yumuşama noktası deneylerinin sonuçları Şekil 4.22.'de gösterilmiştir.



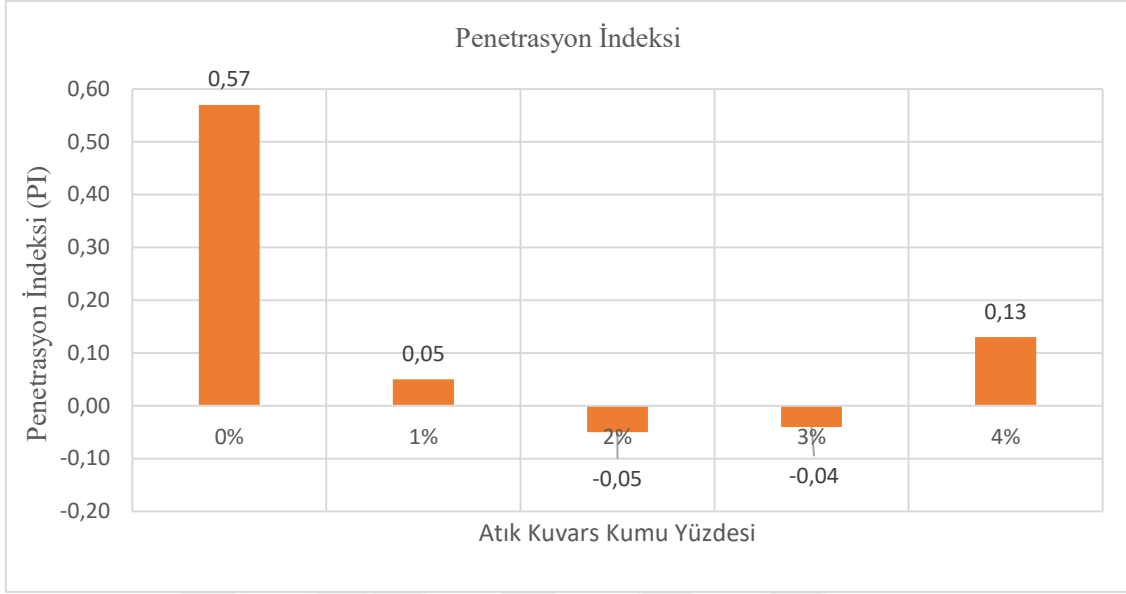
Şekil 4.22. RTFOT deneyi sonrasında yapılan yumuşama noktası deney sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre modifiye bitümlerin tamamında saf bitüm numunesine göre daha yüksek yumuşama noktası değerlerine ulaşılmıştır. Genel olarak atık katkısı oranı arttıkça modifiye bitümlerin yumuşama noktası doğrusala yakın bir şekilde yükselmiştir. Bu değerler arasında saf bitüme göre en büyük artış (%43) %4 atık katkılı modifiye bağlayıcı için elde edilmiştir.

4.16. Penetrasyon İndeksi (PI)

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıklarını belirlenmesi amacıyla yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak ile penetrasyon indeksi değeri

belirlenmektedir. Bağlayıcılar için hesaplanan penetrasyon indeksi sonuçları Şekil 4.23.'de gösterilmektedir.



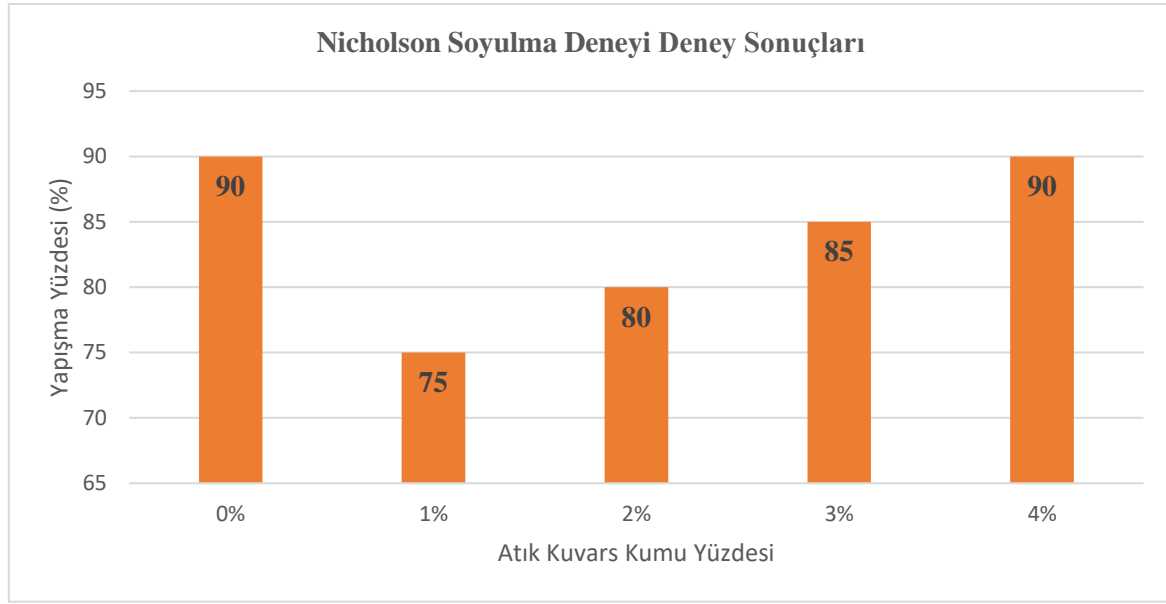
Şekil 4.23. Penetrasyon indeksi sonuçları

Şekil 4.23.'e göre bağlayıcılar için hesaplanan penetrasyon indeksi değerlerinin +2 ile -2 aralığında olduğu görülmektedir. Şekil 43'teki sonuçlara göre B50/70 penetrasyonlu saf bitüme göre atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin ısı duyarlılığını arttığı tespit edilmiştir.

4.17. Nicholson Soyulma Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numunelerin deneyleri yapılmış ve Şekil 4.24'de görülmektedir.

Nicholson soyulma deneyinde kullanılan kalker kökenli agregaların Los Angeles aşınma dayanımı %26, donma-çözünme kaybının %7 ve yassılık indeksi değeri ise %13,6'dır.



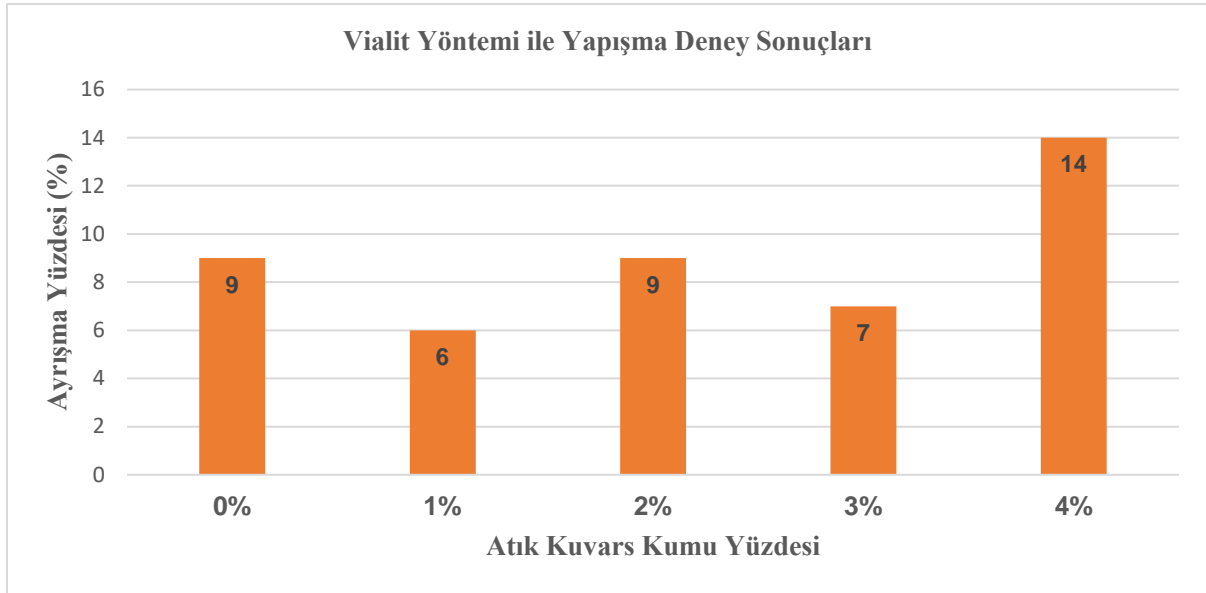
Şekil 4.24. Nicholson soyulma deney sonuçları

Nicholson soyulma deneylerinin sonuçlarına göre, saf bitüme %1, %2 ve %3 oranlarında atık kuvars kumu ilavesinin saf bağlayıcının adezyon yeteneğinde azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. %4 oranında atık katkılı modifiye bağlayıcılarda ise saf bitüm numunesi ile aynı soyulma değeri elde edilmiştir.

4.18. Vialit Yöntemi ile Yapışma Deneyi

B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında eklenen atık kuvars kumu ile modifiye edilen numuneler Şekil 4.25’de verilmiştir.

Vialit yapışma deneyinde kullanılan kalker kökenli agregaların Los Angeles aşınma dayanımı %26, donma-çözünme kaybının %7 ve yassılık indeksi değeri ise %13,6’dır.

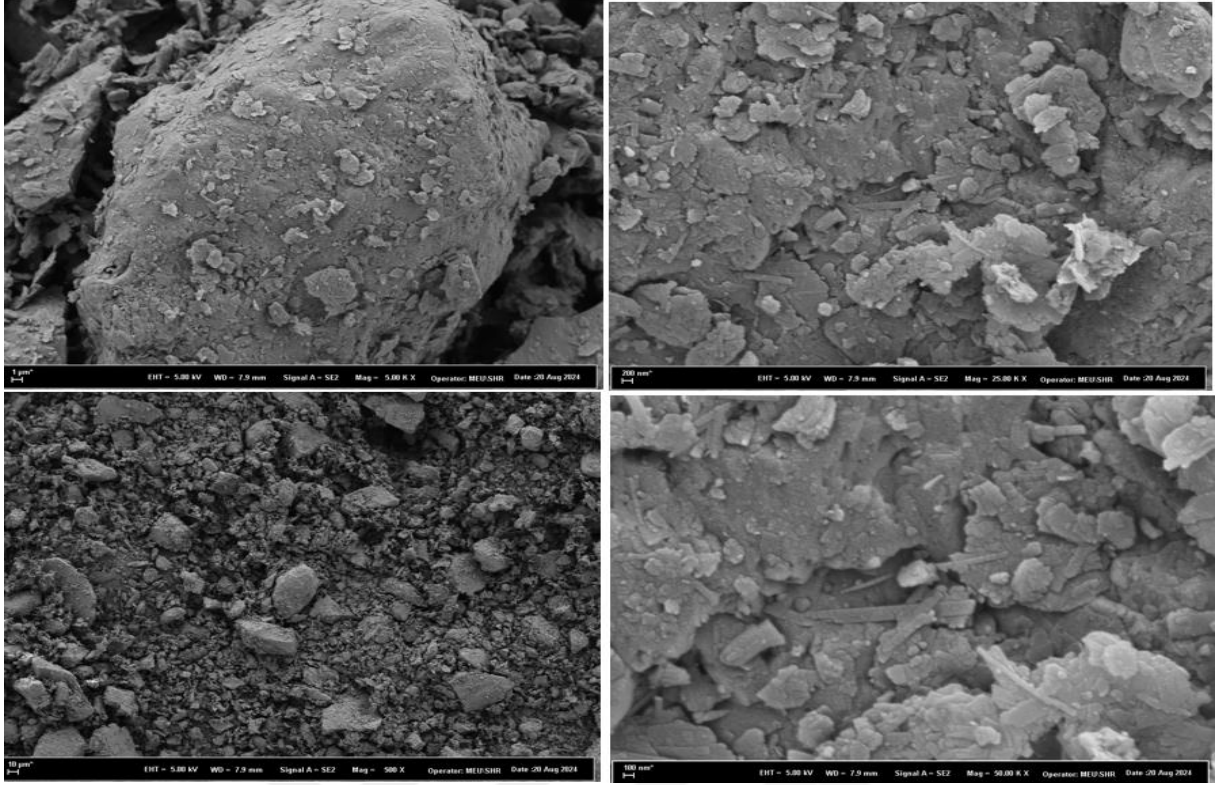


Şekil 4.25. Vialit yöntemi ile yapışma deneyi sonuçları

Şekil 4.25 incelendiğinde agrega ile modifiye bitümün yapışma performansı adezyonu en iyi sonucu %1 ile %3 oranlarının verdiği tespit edilmiştir. %1 ve %3'ün daha homojen dağıldığı ve bu sebeple adezyonun arttığı değerlendirilmektedir. Ağırlıkça saf bitüm ile üç farklı numunenin şartname sınır değerlerini sağlamaktadır. %4 oranda Karayolları Genel Müdürlüğü (KTŞ 2023) şartname limitlerinin 10 veya daha küçük olması gerekliliği sebebiyle şartname değerinin üzerinde kaldığı değerlendirilmiştir. B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ile %2 modifiye bitümün adezyonu sağladığı ancak Karayolları Genel Müdürlüğü (KTŞ 2023) şartname limitlerine sınır değerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deney ile agregaların soyulmasının sırasıyla %4, %2 ve B50/70 penetrasyonlu saf bitümde daha fazla oluşacağı değerlendirilmiştir.

4.19. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

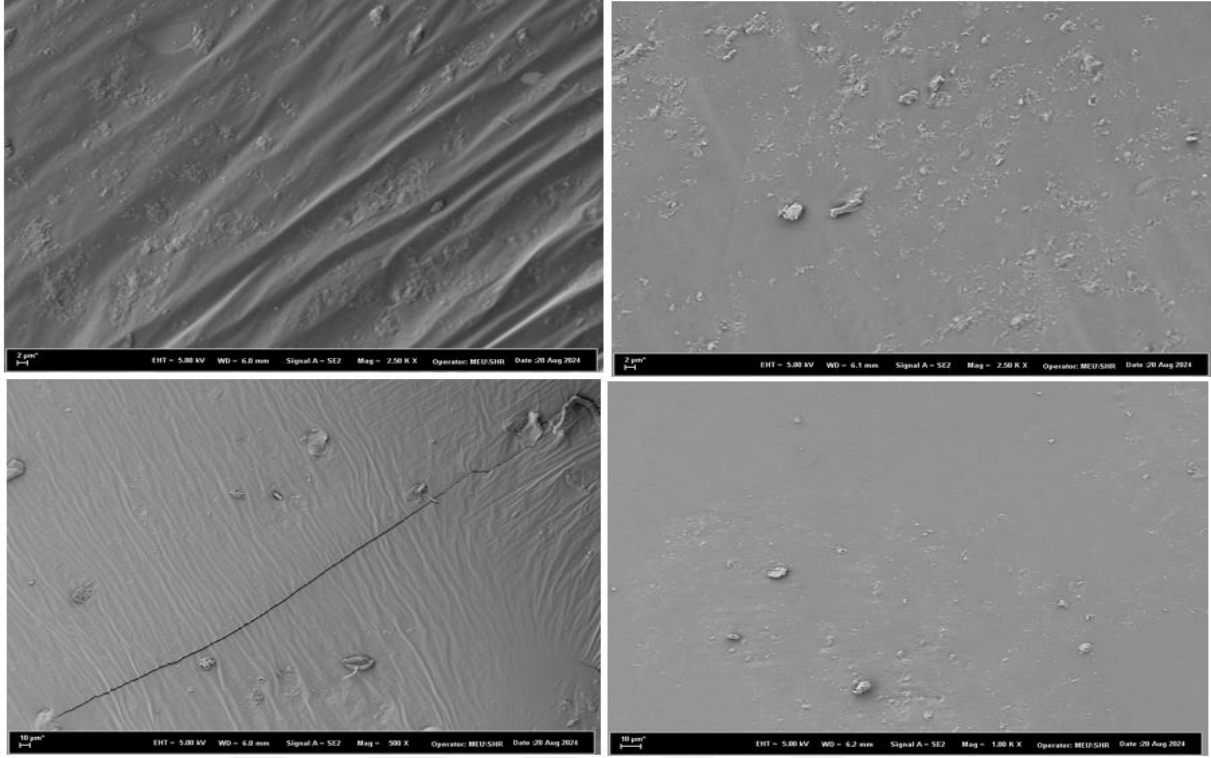
SEM analizleri, atık kuvars kumu numuneleri, saf bitüm ve modifiye bağlayıcı numuneleri için yapılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen görüntüler Şekil 4.26., 4.27., 4.28., 4.29., 4.30., 4.31.'de gösterilmiştir.



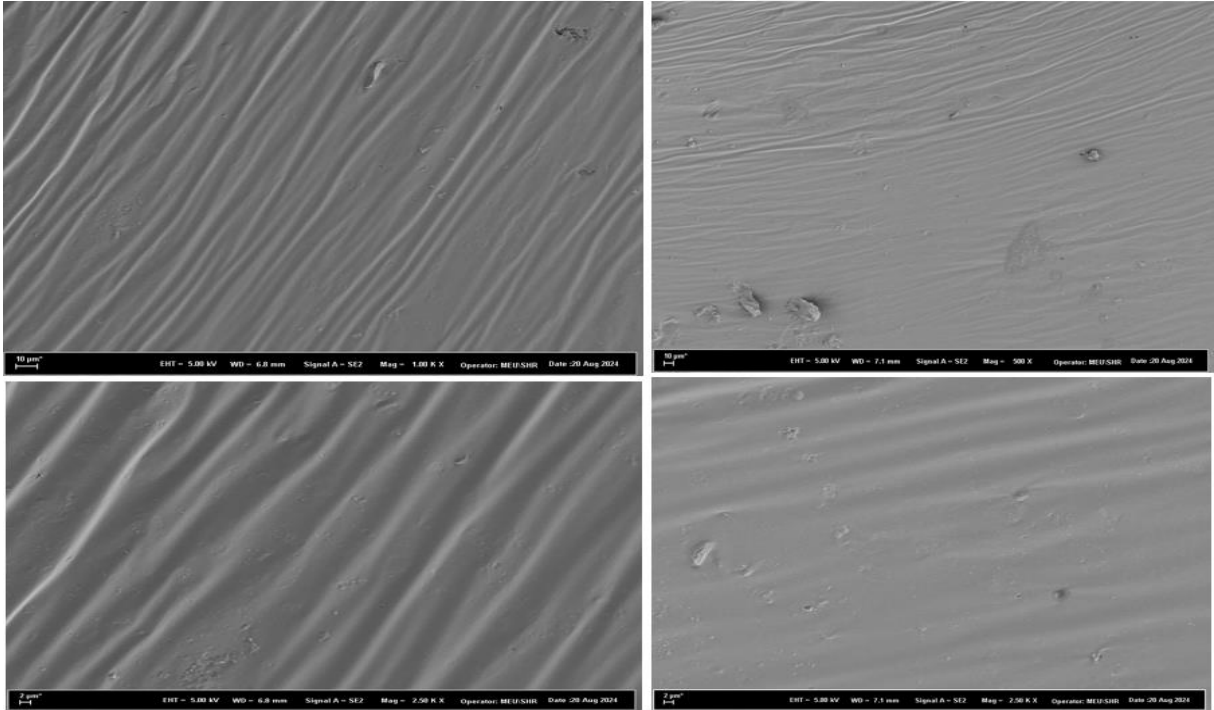
Şekil 4.26. Atık kuvars kumunun SEM cihazında görüntüsü

Şekil 4.26'ya göre atık kuvars kumu taneciklerinin köşeli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Buna göre atık kuvars kumunun bitümlü karışımlar içerisinde agrega kenetlenmesini artırması beklenmektedir.

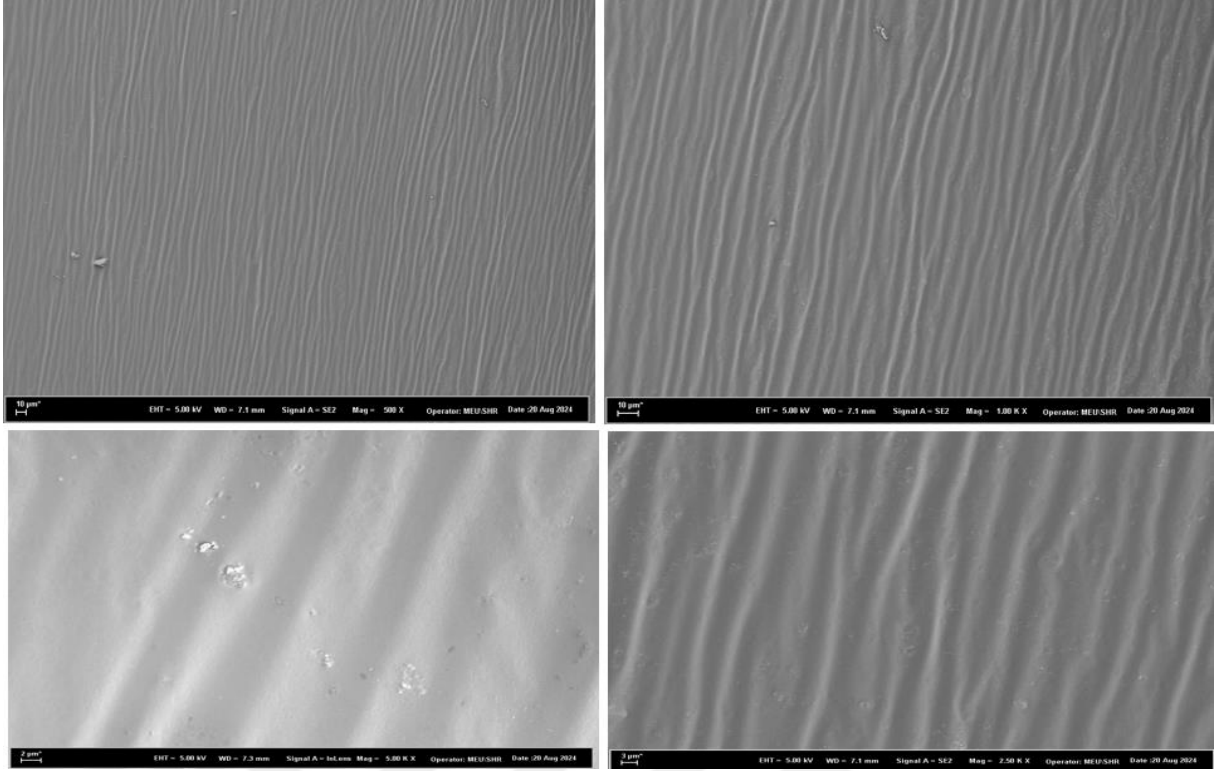
Şekil 4.27.-4.28.-4.29.-4.30-4.31'de verilen görüntülerde ise yapılan modifikasyon içerisinde atık kuvars kumu taneciklerinin homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir.



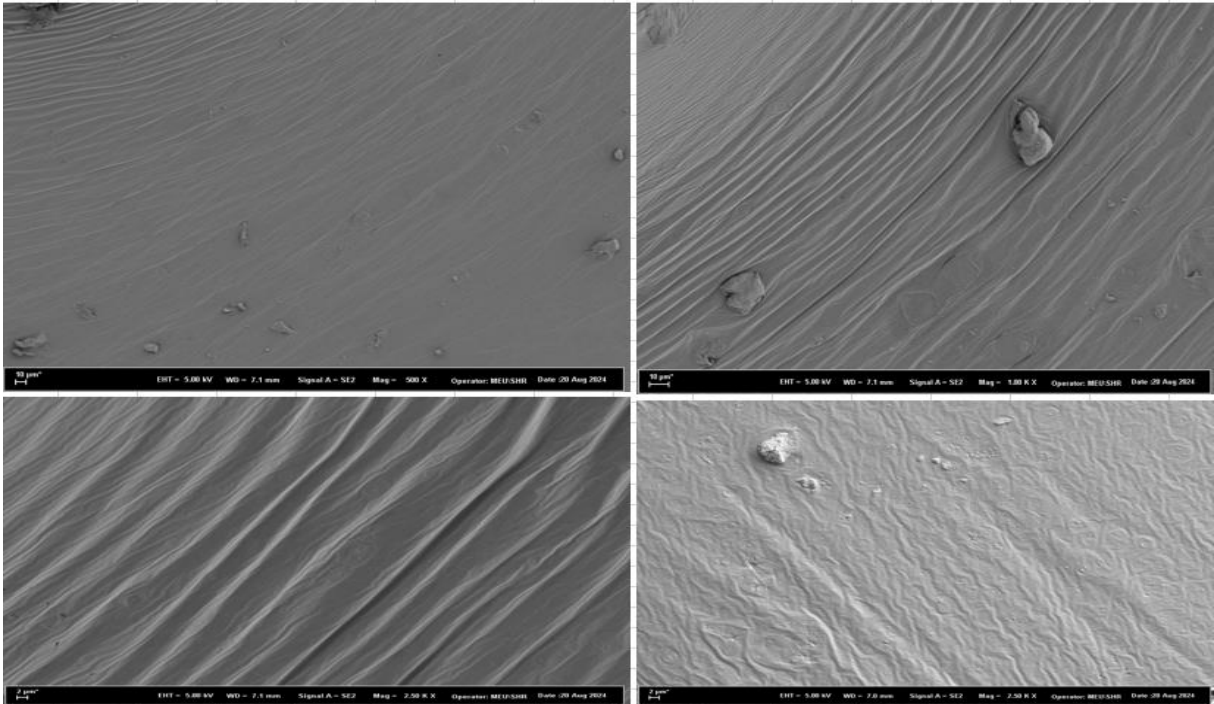
Şekil 4.27. %0 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü



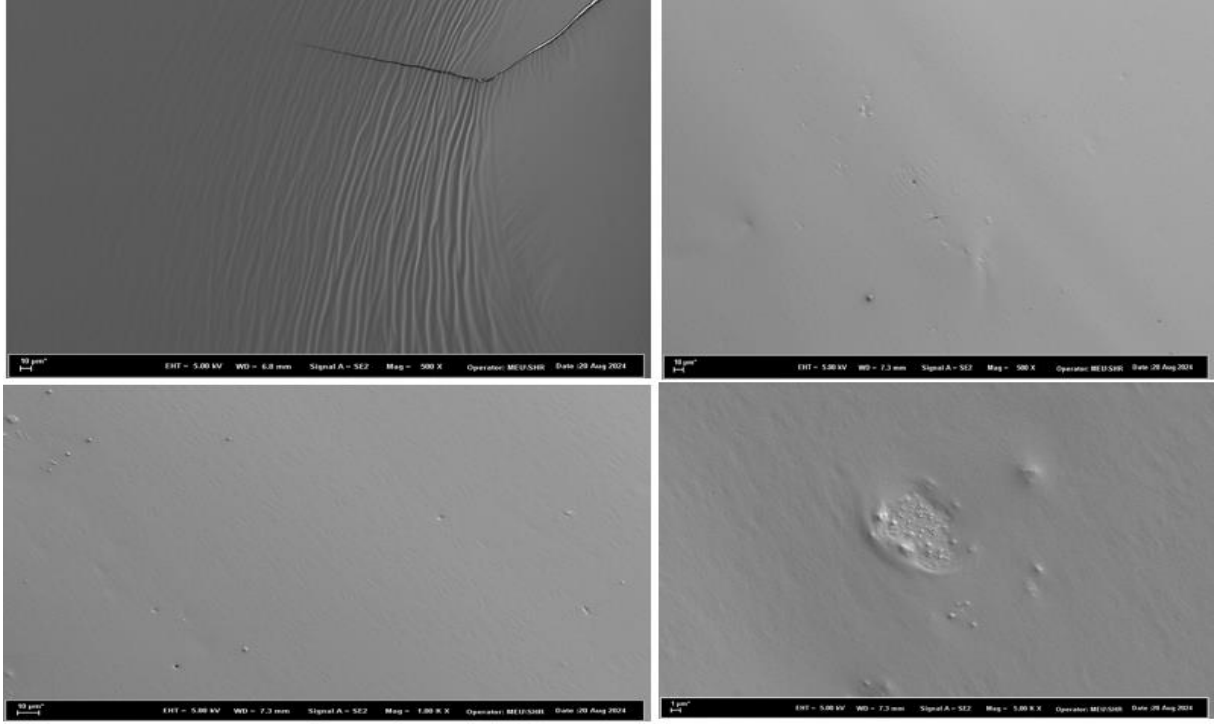
Şekil 4.28. %1 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü



Şekil 4.29. %2 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü



Şekil 4.30. %3 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü



Şekil 4.31.%4 Modifiye SEM deney cihazı görüntüsü



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Atık kuvars kumunun bitüm modifikatörü olarak kullanılabilirliğinin incelendiği bu çalışmada; Modifiye edilen bağlayıcılar ile B50/70 penetrasyonlu saf bitümün performans özellikleri karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümün özgül ağırlığının atık kuvars kumu oranı artışına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.
2. Yanma ve parlama noktası sıcaklıklarının %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümlerde B50/70 penetrasyonlu saf bitüm göre azaldığı tespit edilmiştir. Ancak modifiye bitümlerin yangın tehlikesine karşı direnci yine de sınır değerler içerisinde kalmıştır.
3. Yumuşama noktası ve Penetrasyon deneyleri incelendiğinde; katkı oranının artmasına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin azaldığı ve yumuşama noktası değerinin arttığı belirlenmiştir Buna göre. Atık kuvars kumu ile modifiye edilen bitümlerin kıvamının sertleştiği ve sıcaklık hassasiyetini azaldığı tespit edilmiştir.
4. Depolama stabilitesi sonrası yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçlarına göre %1 ve %2 oranlarında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş numunelerin saf bitüme göre penetrasyon değerlerinde düşüş olduğu, ancak %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu ile modifiye edilmiş numunelerin penetrasyon değerlerindeki artışa bağlı olarak bağlayıcının kıvamının bir miktar yumuşadığı tespit edilmiştir. Depolama sonrası yapılan penetrasyon deneylerinin sonuçları bir arada değerlendirildiğinde üretilen modifiye bitümlerin hepsinin B50/70 penetrasyon derecesini aşmadığı tespit edilmiştir.
5. Depolama sonrasında yapılan yumuşama noktası deneylerine göre atık kuvars kumu modifikasyonun depolanan bitümün yumuşama noktasını yükselttiği tespit edilmiştir.
6. Düktilite deneyi sonuçlarına göre saf bitüm ve ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında atık kuvars kumu eklenerek hazırlanan modifiye bağlayıcıların uzama miktarının aynı olduğu, ancak %3 ve %4 oranlarında atık malzeme eklenerek üretilen modifiye bağlayıcıların düktilite değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen düktilite deney sonuçları bir arada değerlendirildiğinde saf B50/70 bitüme ağırlıkça %2'den daha fazla atık kuvars kumu eklemenin bağlayıcının esneklik özelliğini azalttığı tespit edilmiştir.
7. DSR deneylerinin sonuçlarına göre, yaşlandırılmamış %2 ve %3 atık katkılı modifiye bitümler için $G^*/\sin\delta$ ve G^* değerlerinin saf bağlayıcıya göre arttığı, faz açısının ise saf bağlayıcıya benzer bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir. RTFOT deneyi sonrasında yapılan DSR testlerinde ise $G^*/\sin\delta$, G^* ve δ parametreleri için en iyi sonuçlar %2 atık katkılı modifiye bitümler için elde edilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma etkilerini temsil eden RTFOT yaşlandırması sonrası PAV deneyine tabi tutulan numuneler arasından ise en iyi sonuçların %3 atık kuvars kumu katkılı modifiye bitümler için elde edildiği tespit edilmiştir. DSR sonuçlarına göre genel olarak %3 atık kuvars kumu katkılı modifiye bitümlerin tekerlek izi oluşumuna göre direncinin bir miktar attığı tespit edilmiştir.

8. RTFOT deneylerinin sonuçlarına göre, modifiye bitümlerin kütle kayıplarının şartname sınır değeri olan %1'in altında olduğu tespit edilmiştir.
9. Kiriş Eğilme Reometresi deneylerinin sonucunda, sünme sertliği için şartname limit değerini -6°C ve -12°C sıcaklıklarda B50/70 penetrasyonlu saf bitüm ve ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranlarında atık kuvars kumu katkısı ile modifiye edilen numunelerin tamamının sağladığı tespit edilmiştir. -6°C 'de ölçülen sünme oranı (m-değeri) değerleri arasından şartname sınır değerini %2 atık kuvars kumu katkılı modifiye bitüm numunesi dışında bütün numunelerin sağladığı belirlenmiştir. -12°C 'de yapılan BBR deneylerinde ise şartnamede belirtilen sünme oranı sınır değerini yalnızca %3 ve %4 atık katkılı modifiye bitüm numuneleri sağlamıştır.
10. B50/70 penetrasyonlu bitüm ile modifiye bitüm numunelerinin kuvvet ölçümlü düktilite deney sonuçlarına göre numunelerin tamamının Karayolu Teknik Şartname (2023) sınır değeri olan $\geq 0,5$ j/cm² değerlerini sağlamadığı tespit edilmiştir.
11. Penetrasyon indeksi hesaplamalarına göre, numunelerin tamamı için penetrasyon indeksi değerlerinin sınır değerler olan +2 ile -2 arasında kaldığı belirlenmiştir.
12. Nicholson soyulma deneylerinin sonuçlarına göre, saf bitüme %1, %2 ve %3 oranlarında atık kuvars kumu ilavesinin saf bağlayıcının adezyon yeteneğinde azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. %4 oranında atık katkılı modifiye bağlayıcılarda ise saf bitüm numunesi ile aynı soyulma değeri elde edilmiştir.
13. Vialit yöntemi ile yapışma deneyi sonucunda, saf bitüm ile ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında atık kuvars kumu katkısı ile modifiye edilen bağlayıcıların KTŞ sınır değerini sağladığı tespit edilmiştir. %4 oranına atık kuvars kumu katkısı ile hazırlanan modifiye bağlayıcının ise KTŞ limitlerini sağlamadığı tespit edilmiştir.

Atık kuvars kumu ile modifiye edilen B50/70 penetrasyonlu bağlayıcıya ait deney sonuçlarının tamamı bir arada değerlendirildiğinde yapılan modifikasyondan elde edilen sonuçların fiziksel bir bitüm modifikasyonundan beklenen sonuçlar olduğu açıkça görülmektedir. Deney sonuçlarına göre atık kuvars kumu katkısı bağlayıcının kıvamını sertleştirmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcılar arasında ağırlıkça %3 oranında atık kuvars kumu katkısı ile modifiye edilen bağlayıcıların özellikle sıcak iklimli bölgelerde kullanımının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara dayanarak atık kuvars kumunu bitümlü bağlayıcıların kıvam sertleştirme potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca dayanarak sonraki çalışmalarda kıvamı yumuşak bir bitümlü bağlayıcının veya geri dönüştürülerek kazanılmış bir bağlayıcının özelliklerini (kıvam, sıcak iklim koşullarına dayanıklılık vb.) geliştirmek amacıyla modifiye bitüm numuneleri hazırlanarak reolojik özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

Ahmedzade, P., Alataş, T., & Geçkil, T. (2008). Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı. İMO Teknik Dergi, pp. 4493-4507.

Aydın, H., Yalçın, E., Yılmaz, M., & Alataş, T. (2022). Elvaloy ve Polifosforik Asitle Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, pp. 1122-1128.

Bayraktar, O. Y., Altera, A. Z., & Soylemez, H. (2019). Investigation of the Effects of Modified Bitumen on Asphalt Concrete Performance by Industrial Waste. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, pp. 93-100.

Canpolat, M., Beycioğlu, A., Morova, N., Çetin, S., Hatice, M. Ç., & Gündoğan, H. (2022). Atık Olivin Mineralinin Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, pp. 555-566.

Çetin, H. M. (2022). Nano Malzemelerle Modifiye Edilen Bitüm ve Bitümlü Karışımların Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi: Literatür Araştırması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, pp. 429-448.

Çubuk, M., Gürü, M., & Çubuk, M. K. (2009). Improvement of bitumen performance with epoxy resin. journal homepage: www.elsevier.com/locate/fuel, pp. 1324-1328.

Demirkaya, Ö., & Terzi, S. (2017). Karbon Liflerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, pp. 542-548.

François, D., & Jullien, A. (2009). A framework of analysis for field experiments. Waste Management, pp. 374-382.

Furtana, B., Yalçın, E., Kök, V. B., & Yılmaz, M. (2019). EVA Bazlı Reçine Modifiyeli Bitümlü Karışımların Mekanik Özellikler Bakımından SBS Modifikasyonu ile Karşılaştırılması. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, pp. 497-506.

Geçkil, T., İnce, C. B., & İssi, S. (2022). Pirina Modifiyeli Bitümlerin Yüksek Sıcaklıklardaki İşlenebilirliği ve Kalıcı Deformasyon Direnci. Politeknik Dergisi, pp. 745-755.

Gökalp, İ. (2021). Polifosforik Asit (PPA) Modifiye Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Araştırılması. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, pp. 785-795.

Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H., & Uz, V. E. (2019). Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 8, Sayı 2, pp. 954-964.

Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H., & Uz, V. E. (2019). Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, pp. 954-964.

Güzelçiçek, A. (2019). Tunceli İlinin Farklı Noktalarından Alınan Kum Numunelerinin XRF Spektrometresi ile Kimyasal Analizi. Tunceli: Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. (2017). Performance Evaluation Of Hot Mix Asphalt (HMA) Containing Bitumen Modified With Gilsonite. Construction and Building Materials, pp. 156-164.

Jew, P., Shimizu, J., Svazic, M., & Woodhams. (1986). Polyethylene-modified bitumen for paving applications. Journal of Applied Polymer Science, pp. 2685-2704.

Kaçaroğlu, G., & Saltan, M. (2019). Cocamide diethanolamide kimyasalının bitüm modifikasyonunda kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, pp. 1042-1047.

Karakılçık, G., & Sedat, T. (2019). Endüstriyel Ham Madde Atıklarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, pp. 121-133.

Keyf, S. (2010). Investigation Of Penetration And Penetration Index In Bitumen Modified With Sbs And Reactive Terpolymer. Journal of Engineering and Natural Sciences, pp. 26-34.

Köfteci, S., Ahmedzade, P., & Kultayev, B. (2014). Performance Evaluation Of Bitumen Modified By Various Types Of Waste Plastics. Construction and Building Materials, pp. 592-602.

Köse, M., & Türeli, T. K. (1986). Cam Üretiminde Kullanılan Kuvars Kumlarında Aranılan Özellikler Zenginleştirme Yöntemleri ve Yozgat Sarıkaya Kuvarsitlerinin Bu Açından İncelenmesi. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknoloji Dairesi.

Kumandaş, A., Çavdar, E., Pancar, E. B., & Oruç, Ş. (2021). Reaktif etilen terpolimerlerin bitümün modifikasyonunda kullanımı: Bir. Güfbed/Gustij, pp. 845-862.

Luo, W.-q., & Chen, J.-c. (2010). Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer. Construction and Building Materials, pp. 1830-1835.

Moradı, A. N. (2021). Seydiler (Afyonkarahisar) Diyatomitleri ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin Araştırılması. Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Motlagh, A. A., Kiasat, A., Mirzaei, E., & Birgani, F. O. (2012). Bitumen Modification Using Carbon Nanotubes. World Applied Sciences Journal, pp. 594-599.

Mouillet, V., Lamontagne, J., Durrieu, F., Planche, J.-P., & Lapalu, L. (2008). Infrared Microscopy Investigation Of Oxidation And Phase Evolution In Bitumen Modified With Polymers. Available online at www.sciencedirect.com, pp. 1270-1280.

Öner, J. (2019). Examination Of Storage Stability Behaviour Of Polymer Modified Bitumen Involving Nanoclay. Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, pp. 49-55.

Öz Kıcı, G., & Saltan, M. (2020). Pirinanın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımının Araştırılması. Süleyman Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, pp. 1-9.

Rasman, M., Hassan, N. A., Hainin, M. R., Jaya, R. P., Haryati, Y., Shukry, N. A., Kamaruddin, N. H. (2018). Engineering properties of bitumen modified with bio-oil. The 12th International Civil Engineering Post Graduate Conference (Sepka) – The 3rd International Symposium on Expertise of Engineering Design (Sepka-Iseed 2018).

Saltan, M., & İnkaya, N. (2020). Usage of Waste Plastics in Road Pavements., pp. 158-163.

Serin, S., & Demirezer, S. E. (2021). Investigation of wetting and hydrophobic properties of bitumen modified with different vegetable oils. Journal of Innovative Transportation.

Sienkiewicz, M., Labuda, K. B., Wojtkiewicz, A., & Janik, H. (2017). Development Of Methods Improving Storage Stability Of Bitumen Modified With Ground Tire Rubber: A Review. *Fuel Processing Technology*, pp. 272-279.

Sümen, B., & Morova, N. (2022). Serpantinin Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, pp. 75-86.

Şehnaz Tıraş, M. R. (2023). Pirina Yağının Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı. *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri*.

Tacıroğlu, M. V. (2023). Comparison of elvaloy and styrene-butadiene-styrene added polymer modified bitumen. *Journal of Innovative Transportation*, pp. 25-32.

Tacıroğlu, M. V., Ergezer, F., Baykal, T., Eriskin, E., & Terzi, S. (2022). Investigation of waste quartz sand as filler in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*.

Terzi, S., & Karaşahin, M. (2003). Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonu Karışımında Filler Malzemesi Olarak Kullanımı. *Teknik Dergi*, pp. 2903-2922.

Tımorı, M. I., & Tigdemir, M. (2022). Asfalt Beton Kaplamalarında Tunçbilek Uçucu Külünün Filler Olarak Kullanılmasının Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, pp. 126-141.

Varol Morova, H. (2023). Atık Cam Tozunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Değerlendirilmesi. *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi Cilt 13, Sayı 1*, pp. 29-33.

Yayla, N. (2015). *Karayolları Mühendisliği*. İstanbul: Birsen Yayın Dağıtım.

Yıldırım, Z. B., Karacasu, M., & Okur, D. V. (2018) Atık Lastik ve Cam Lif ile Modifiye Edilmiş Bitümün Asfalt Betonu Performansına Etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, pp. 1019-1027.

Yılmaz, M., Kök, B. V., & Erdoğan Yamaç, Ö. (2017). Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren ile Gilsonit'in Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyon Dayanımına Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 811-822.

Gültekin, M., Nayır, N., Ziya, U., Çalışkan, K. K., Öztürk, A., Tutan, S. N., & Komut, M. (2021). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. Ankara: KGM.

Demir, M. (2011). SBS.EVA ve Reaktif Terpolimer Kullanılarak Bitüm Modifikasyonu. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). Sene Başı Bütçesi ve Merkezi Yönetim Bütçesine Oranı. Ankara: www.kgm.gov.tr.

Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. Ankara: www.kgm.gov.tr.

Öztürk, M. (2018). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre ve Şehir Kütüphanesi. Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği ve Önlemleri: http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/5mgT7FNMcjwz.pdf

TS EN 12607-1. (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 1: RTFOT yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 12607-1. (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Isı ve hava etkisi altında sertleşmeye karşı direncin belirlenmesi-Bölüm 1:RTFOT yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 12697-11. (2020). Bitümlü karışımlar- Test yöntemleri- Bölüm 11: Agregaya ve bitüm arasındaki benzeşmenin belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 13399. (2018). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Modifiye bitümün depolama stabilitesinin belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 13589. (2018). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- Kuvvet uygulamalı süneklik yöntemiyle modifiye bitümün gerilme özelliklerinin belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 1426. (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- İğne penetrasyonunun belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 1427. (2015). TS EN 1427 (2015). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Yumuşama noktasının belirlenmesi- Halka ve Top yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 14769. (2023). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- Basınçlı yaşlandırma kabı (pav) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 14770. (2012). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar Karmaşık kayma modülü ve faz açısının belirlenmesi- Dinamik Kayma Reometresi (DSR). Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 14771. (2012). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Eğilme akma sertliğinin tayini- Eğilme Kirişi Reometresi (BBR). Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN 15326+A1. (2010). Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Yoğunluk ve özgül ağırlık ölçümü- Kılcal durduruculu piknometre yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

TS EN ISO 2592. (2017). Parlama ve yangın noktalarının belirlenmesi- Cleveland açık kap yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü: <https://www.tse.org.tr/>

www.kgm.gov.tr. (2023). KGM. Ankara: www.kgm.gov.tr.

Yüknü, K., Öztürk, T., & Komut, M. (2021). Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü