

**SEYDİLER (AFYONKARAHİSAR) DİYATOMİTLERİ İLE MODİFİYE
EDİLMİŞ BİTÜMLERİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Nazar MORADI

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.02 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEYDİLER (AFYONKARAHİSAR) DİYATOMİTLERİ İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLERİN REOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ali Nazar MORADI

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Ali Nazar MORADI tarafından hazırlanan "Seydiler (Afyonkarahisar) Diyatomitleri ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Cahit GÜRER
İkinci Danışman : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Başkan : Prof. Dr. Yaşar KİBİCİ
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

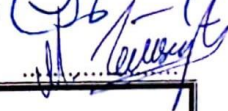
Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Cahit GÜRER
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Ahmet YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACIROĞLU
Mersin Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

İmza



Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..... /..... /..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

05 / 05 / 2021

Ali Nazar MORADI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SEYDİLER (AFYONKARAHİSAR) DİYATOMİTLERİ İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLERİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ali Nazar MORADI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman: Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada, karayollarında trafik hacimleri ve dingil yüklerinde meydana gelen artışlar mevcut bitümlü karışım kaplamaların daha dayanıklı ve uzun servis ömürlü olmasını zorunlu kılmaktadır. Çevresel koşullardaki değişimle birlikte giderek artan taşıt trafiği, asfalt kaplamalar için temel bozulma faktörleri olarak kabul edilmektedir. Artan trafik hacmi, aşırı yükleme, iklim ve yapım koşullarından gelen olumsuz etkiler de eklendiğinde yorulma çatlakları, tekerlek izi deformasyon oluşumu, su hassasiyeti ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Bu tür sorunların giderilmesinde, bitümün Stiren Bütadien Stiren, EVA vb. farklı modifikatörler ile modifiye edilerek asfalt kaplamaların performansını artırmak en yaygın ve ekonomik yöntem olarak uygulanmaktadır. Fakat bu modifikatörler patentli ve ithal ürünler oldukları için birim fiyatları oldukça pahalıdır ve asfaltın birim fiyatının da artmasına neden olurlar. Halbuki ülkemizde de yaygın olarak bulunan diyatomit gibi doğal maddelerle de bitüm modifiye edilerek bağlayıcının reolojik özellikleri geliştirilebilir. Bu tez çalışması kapsamında Afyonkarahisar Seydiler Bölgesinde bulunan diyatomitlerin bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki potansiyel etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla 4 farklı tabakadan (KD1,KD2,KD3,KD4) diyatomit numuneleri alınarak bu numunelerle üç farklı oranda (Ağırlıkça %7, 12 ve 17) bitüm modifikasyonu yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X-Işınları Difraktometresi (XRD) gibi mineraolojik ve petrografik değerlendirmelerle, X-Işınları floresans (XRF) analizi, özgül yüzey alanı ve tane boyutu dağılımı yapılmak

karakterizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Modifiye bitüm numuneleri üzerinde ise penetrasyonu, yumuşama noktası, özgül ağırlık, dönel viskozimetre (RV), dönen ince film halinde yaşlanma (RTFOT), yaşlanma sonrası yumuşama noktası ve penetrasyon, dinamik kesme reometresi (DSR) ölçümleri, Vialit yapışma ve Nicholson soyulma deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar şahit bitüm numunesine ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak diyatomitte modifiye edilen bitümlerin reolojik özelliklerinin geliştiği ve modifiye bitümlerin düşük ve orta trafik hacimli yollarda ekonomik bir modifikatör olarak kullanılabilereği sonuçlarına ulaşılmıştır.

2021, xiii + 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bitüm Modifikasyonu, Diyatomit; Reolojik Özellikler;
Mineraolojik Özellikler.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMEN MODIFIED WITH DIATOMITES FROM SEYDILER (AFYONKARAHISAR) PROVINCE

Ali Nazar MORADI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Co-Supervisor: Prof. Ahmet YILDIZ

In recent years, the increase in traffic volumes and axle loads on highways in our country and in the world necessitates the existing bituminous mixture pavements to be more durable and long service life. Increasing vehicle traffic with changes in environmental conditions is considered as the main deterioration factors for asphalt pavements. When the increased traffic volume, overloading, adverse effects from climate and construction conditions are added, permanent deformations such as fatigue cracks, rutting, water sensitivity and ondulation are occurred. In order to eliminate such problems, bitumen can be used with SBS, EVA and etc. modified, this is the most common and economical method to increase the performance of asphalt pavements by modification with different modifiers. Since these modifiers are patented and imported products, their unit prices are quite expensive and they cause the unit price of asphalt to increase. However, the rheological properties of the binder can be improved by modifying bitumen with natural materials such as diatomite, which are widely available in our country. Within the scope of this master's thesis study, the potential effects of diatomites on the rheological properties of bituminous binders were investigated. For this purpose, diatomite specimens were taken from four different layers (KD1, KD2, KD3, KD4) from Afyonkarahisar, Seydiler region, and bitumen modifications were performed with the specimens at three different rates (%7, 12 and 17 by weight). In addition, the characterization study was carried out by conducting minerological and petrographic evaluations, chemical analysis, scanning electron microscopy (SEM) examination, specific surface area and particle size

distribution, X-Ray Fluorescence Spectrometer Examination (XRF) and X-Ray Diffractometry (XRD) analyzes on the specimens. Penetration, softening point, specific gravity, rotational viscometer, rolling thin film test (RTFOT), softening point and penetration after RTFOT, dynamic shear rheometer (DSR) measurements, Vialite adhesion and Nicholson stripping tests were carried out on modified bitumen specimens and obtained the results are compared with the results of the control bitumen specimen. As a result, it was concluded that the rheological properties of diatomite modified bitumens improved and that this type of modified binder could be used as an economical modifier on medium traffic volume roads.

2021, xiii + 113 pages

Keywords: Bitumen Modification, Diatomite; Rheological Properties; Mineralogical Properties.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Cahit GÜRER'e ve ikinci tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet YILDIZ, Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROğLU, ve KGM 5. Bölge müdürlüğü Ar-Ge Başmühendisi Ergün YALÇIN'aher konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez çalışmasını 20.FEN.BİL.02 proje ile AK-BAPK tarafından destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinasyon birimine, ve laborant Ahmet İBA'ya teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ali Nazar MORADI
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Diyatomit	5
2.2 Asfalt Kaplamalar ve Modifikasyon.....	9
2.3 Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
3.1 Materyal	43
3.1.1 Agrega	43
3.1.2 Bitüm.....	44
3.1.3 Diyatomit	45
3.2 Yöntem.....	47
3.2.1 Diyatomit Örneklerinin Karakterizasyonu	49
3.2.1.1 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri	49
3.2.1.2 X-Işınları Kırınımı (XRD) İncelemeleri.....	50
3.2.1.3 X-Işını Floresans (XRF) İncelemeleri.....	51
3.2.1.4 Tane Boyut Analizi	52
3.2.1.5 Özgül Ağırlık.....	52
3.2.1.6 Yüzey Alanı ve Gözenek Boyut Dağılımı Analizi.....	55
3.2.2 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerinde Uygulanan Deneyle.....	55
3.2.2.1 Bitüm Özgül Ağırlık Deneyi	55
3.2.2.2 Penetrasyon Deneyi.....	57
3.2.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi.....	59

3.2.2.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi	60
3.2.2.5 Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi	62
3.2.2.6 Dinamik Kayma Reometre (DSR) Deneyi	63
3.2.2.7 Vialit Yapışma Deneyi	64
3.2.2.8 Nicholson Soyulma Deneyi.....	65
3.2.3 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti	67
3.2.3.1 Penetrasyon İndeksi (PI)	67
4. BULGULAR	69
4.1 Diyatomit Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Deneyleri.....	69
4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri	69
4.1.2 X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri.....	73
4.1.3 X-Işını Floresans (XRF) İncelemeleri.....	75
4.1.4 Tane Boyutu Analizi	76
4.1.5 Özgül Ağırlık Deneyi.....	78
4.1.6 Yüzey Alanı ve Gözenek Boyut Dağılımı Analizi.....	79
4.2 Modifiye Bitüm Deney Sonuçları.....	80
4.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	80
4.2.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları	81
4.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	83
4.2.4 Dönen İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları.....	84
4.2.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi Sonuçları	87
4.2.6 Vialit Yapışma Deneyi Sonuçları.....	93
4.2.7 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.	94
4.2.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları	95
4.3 Penetrasyon İndeksi Hesaplamalarının Değerlendirilmesi	101
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	104
6. KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al ₂ O ₃	Alüminum Oksit
cP	Centipoise
d	Faz Açısı
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
°C	Santigrad
Gr	Gram
CaO	Kalsiyum Oksit
kpa	Kilo Paskal
G*	Kompleks Modülü
MgO	Magnezyum Oksit
Mpa	Mega Paskal
m ³	Metreküp
mm	Mikrometre
mm	Milimetre
pa. s	Pascal Saniye
K ₂ O	Potasyum Oksit
cm	Santimetre
SiO ₂	Silikon Dioksit
V	Voltaj
%	Yüzde

Kısaltmalar

AC	Asfalt Çimentosu (Asphalt Cement)
AI	Yaşlanma İndeksi (Aging İndeks)
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASTM	Uluslararası Amerikan Test Ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
BET	Brunauer, Emmett and Teller
BSF	Bitümlü Selülozik Fiber
BSK	Bitümlü Sıcak Karışımlar
CAM	Kontrol Asfal Mastik (Control Asphalt Mastic)
CR	Kirinti Kauçuk
DA	Diyatomit Asfalt Mastiği
DFC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DİA	Diyatomit
DK	Dakika
DMA	Diyatomit Modifiye Asfalt
DRR	Düktilite Tutma Oranı
DSR	Dinamik Kesme Reometresi (Dynamic Shear Rheometer)
DT	Yumuşama Noktası Artışı
EVA	Etilen Vinil Asetat
JAI	Deformasyon Enerji Yaşlanma İndeksi

Kısaltmalar (Devam)

FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (Fourier Transform Infrared Spectrometer)
HTM	Sıcak Asfal Karışımı (Hot Mixe Asphalt)
IR	Kızılötesi Spektroskopi
MA	Mineral Tozu Asfalt Mastiği
OBC	Optimum Bitüm İçeriği (Optimum Bitumen Cement)
PE	Polietilen
PG	Penetrasyon Sınıf (Penetration Grade)
PI	Penetrasyon İndeksi (Penetration İndeks)
PMB	Polimer Modifiye Bitüm
PP	Polipropilen
PRP	Tutulmuş Penetrasyon Oranı
PS	Polistren
PVC	Polivinilklorid
PVN	Penetrasyon-Viskozite Numarası (Penetration-Viscosity Number)
RA	Kaya Asfalt (Rock Asphalt)
RPM	Revolutions Per Minute (Dakikadaki devir sayısı)
RTFOT	İnce Film Halinde Isıtma (Rolling Thin Film Oven Test)
RV	Dönel Viskozite (Rotational Viscosity)
SBR	Sentetik Bütadien Kopolimer
SBS	Stiren Bütadien Stiren
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TC	Termal İletkenlik
TE	Tespit edilmedi
TİO	Tekerlek İzinde Oturma Tayini
TMA	Taş Mastik Asfalt (Stone Asphalt Mastic)
TUAM	Teknoloji Uygulama Ve Araştırma Merkezi
TÜPRAŞ	Türkiye Petrol Rafinerileri
VAI	Viskozite Yaşlanma İndeksi
VB	Ve Benzeri
VC	Hücre Hacmi
VP	Toz Hacmi
VR	Referans Hacim
VTS	Viskozite Sıcaklık Hassasiyeti (Viscosity Temperature Sensitivity)
WEO	Motor Atık Yağı (Waste Enerji Oil)
XRD	X-Işını Difraktometre (X-ray Powder Diffraction)
XRF	X-Işını Floresans Spektroskopisi (X-ray Fluorescence)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları (Çubuk 1998).....	16
Şekil 2.2 Diyatomit katkılı tekerlek izinde oturma numunesi (sağ tekerlek) üzerinde oluşan tio%'si miktarı (Kaşak 2007).....	18
Şekil 2.3 Diyatomit katkılı tekerlek izinde oturma numunes (sağ tekerlek) üzerinde oluşan tio	18
Şekil 2.4 Tekerlik izinde oturma tayını geleneksel karşılaştırma (Kaşak, 2007).....	18
Şekil 2.5 Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin 135 °C'da viskoziteleri ve depolama stabilitesine etkisi (Cong vd .2012).	21
Şekil 2.6 Marshall stabilite değerleri (Ling vd.2014).	25
Şekil 2.7 TFOT öncesi ve sonrası içeriğe karşı asfalt (Chneg vd.2015).	27
Şekil 2.8 Düşük sıcaklıkta yarma testinin sonuçları (Zhu vd.2018).	37
Şekil 3.1 Şekil . İnceleme alanının jeoloji haritası (Metin vd., 1987; Yıldız, 1997'den değiştirilerek alınmıştır).	45
Şekil 3.2 Çalışma yöntem akış şeması	49
Şekil 4.1 KD1 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.	73
Şekil 4.2 KD2 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.	74
Şekil 4.3 KD3 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.	74
Şekil 4.4 KD4 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.	75
Şekil 4.5 KD1 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.	77
Şekil 4.6 KD2 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.	77
Şekil 4.7 KD3 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.	78
Şekil 4.8 KD4 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.	78
Şekil 4.9 Diyatomit numunelerinin gerçek özgül ağırlık değerleri.	79
Şekil 4.10 Diyatomitlerin yüzey alanları.....	80
Şekil 4.11 Diyatomid ile modifiye edilmiş bitümlerin özgül ağırlık değeri değişimleri 81	
Şekil 4.12 Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin 25 °C'deki penetrasyon değeri değişimleri.	82
Şekil 4.13 Diyatomid ile modifiye edilmiş bitümlerin yumuşama noktası değişimleri. 83	
Şekil 4.14 Diyatomitlerin Kütle Kaybı.	84
Şekil 4.15 RTFOT Deneyi sonrası penetrasyon değerlerindeki azalmalar.	85
Şekil 4.16 RTFOT Deneyi sonrası yumuşama noktasındaki artışlar.	86

Şekil 4.17	KD1 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.	87
Şekil 4.18	KD2 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.	88
Şekil 4.19	KD3 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.	89
Şekil 4.20	KD4 Modifiye Bitüm Numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.	90
Şekil 4.21	Diyatomitle modifiye edilmiş bitümlerin VTS indeksi değişimleri.	92
Şekil 4.22	135 °C'deki modifikasyon indisi değişimleri.	92
Şekil 4.23	165 °C'deki modifikasyon indisi değişimleri.	93
Şekil 4.24	Vialit yapışma deneyinde düşen agrega sayısı değişimleri.	94
Şekil 4.25	Nicholson deney sonuçlarına göre soyulmadan kalan agrega yüzeyi değişimleri.	95
Şekil 4.26	KD1 Diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.	96
Şekil 4.27	KD2 Diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.	96
Şekil 4.28	KD3 Diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.	97
Şekil 4.29	KD4 Diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.	97
Şekil 4.30	KD1 Diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.	98
Şekil 4.31	KD2 Diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.	99
Şekil 4.32	KD3 Diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.	99
Şekil 4.33	KD4 Diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.	100
Şekil 4.34	Penetrasyon indeksi değişimleri.	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Tekerlek izinde oturma deney sonuçları (Kaşak 2007).....	19
Çizelge 2.2 RTFOT deney sonuçları (Cong vd .2012).....	21
Çizelge 2.3 Saf bitüm ve diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların deney sonucu (Yi-qui vd.2012).....	22
Çizelge 2.4 Konvansiyonel deney sonuçları diyatomit modifiye asfalt üzerindeki göstergeler (Zhang vd. 2012).	23
Çizelge 2.5 Gelenkesel bitüm fiziksel özellikleri.....	26
Çizelge 2.6 Diyatomit özellikleri.	32
Çizelge 2.7 Diyatomit ve bazalt lif içeriği.	32
Çizelge 2.8 Dönel viskozite testi (Huang vd. 2019).....	40
Çizelge 3.1 Agregas fiziksel ve mekanik özellikleri (Korkmaz 2021).....	43
Çizelge 3.2 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri.....	44
Çizelge 4.1 Diyatomit örneklerinin XRD yönteminde belirlenmiş amorf faz oranları..	73
Çizelge 4.2 Ham diyatomitin kimyasal analiz sonucu.	76
Çizelge 4.3 Diyatomit örneklerin tane boyut analiz sonuçları.	77
Çizelge 4.4 KD1 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları....	88
Çizelge 4.5 KD2 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları....	89
Çizelge 4.6 KD3 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları....	89
Çizelge 4.7 KD4 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları....	90
Çizelge 4.8 KGM/64-05/S-M 2021 pozuna göre modifiye bitüm ile 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılmasına ait birim fiyat analizi.....	103

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Diyatomit mikro yapısı (Kaşak 2007, İnt.Kyn.2).	6
Resim 2.2 Diyatomit yatağı (Afyonkarahisar, İnt.Kyn.2).....	6
Resim 2.3 Farklı dolgu türleri (a) hidratlanmış kireç, (b) çimento ve (c) diyatomit (shukry vd. 2018).	35
Resim 3.1 Kireçtaşı agregası, a) 4-11 mm. b) 11-22 mm.	43
Resim 3.2 Seydiler (Afyonkarahisar) Karakaya Mahallesinde özel bir şirket tarafından işletilen diyatomit ocağında örnekleme yapılan seviyeler; (KD1): Krem renkli tuf içerikli diyatomit, (KD2): Beyaz renkli saf diyatomit, (KD3): Krem renkli tuf ve opal içerikli diyatomit ve (KD4): Beyaz renkli saf diyatomit.	47
Resim 3.3 Sıcaklık ve devir kontrollü modifiye bitüm mikseri.	48
Resim 3.4 LEO VP-1431 model taramalı elektron mikroskobu.	50
Resim 3.5 Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı.	51
Resim 3.6 Gaz piknometresi	53
Resim 3.7 Bitüm özgül ağırlık piknometresi deney aşamaları	56
Resim 3.8 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları	58
Resim 3.9 Yumuşama noktası deney cihazı.....	60
Resim 3.10 Dönel (Brookfield) viskozimetre (RV) deney cihazı (AKÜ İnşaat MÜH LAB).....	61
Resim 3.11 RTFOT deney cihazı (Afyon Belediye LAB).....	63
Resim 3.12 Dinamik kesme reometre Cihazı (DSR).	64
Resim 3.13 Vialit deney aparatları, numunelerin üretimi ve çelik bilya düşürülerek deneyin yapılması.	65
Resim 3.14 Nicholson soyulma deneyi numunelerinin hazırlanması.	66
Resim 4.1 KD1 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.	70
Resim 4.2 KD1 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.	70
Resim 4.3 KD2 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.	71
Resim 4.4 KD3 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.	71
Resim 4.5 KD3 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü ve gözenekli kavkı yapıları.	72
Resim 4.6 KD4 diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.....	72

1. GİRİŞ

Son yıllarda tüm dünyada yolların trafik hacimlerinde meydana gelen artış asfalt kaplamaların normalden daha erken bozulmasına ve daha fazla bakım onarım yapılmasına neden olmakta, bu da bilim insanlarını ve mühendisleri daha uzun ömürlü asfalt kaplama yapma yöntemlerini araştırmaya zorunlu kılmaktadır. Bu tip uzun servis ömürlü asfalt kaplamalar için bitümün modifiye edilerek kullanılması karayolu mühendislerinin karşısına önemli bir seçenek olarak çıkmaktadır.

Bitümün modifiye edilmesini gerektiren bir diğer sebep de, sınırlı petrol kaynaklarının tümünün bitüm üretimi için uygun olmayışıdır. Son yıllarda petrol rafineri tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, rafinerilerde üretilen bitüm miktarları azalmış bu da bitüm birim fiyatlarının giderek yükselmesine neden olmuştur. Bu durumda karayolu idareleri mevcut asfalt kaplamalar için farklı alternatiflerin arayışlarına girmiştir. Bitümün çeşitli maddelerle modifiye edilerek, reolojik özelliklerinin geliştirilmesi ve bu sayede asfalt kaplamaların trafik yükü, iklim, sıcaklık hassasiyeti vb. etkilere karşı dayanımlarının artırılması son yıllarda bu konudaki araştırmacıların en çok çalıştıkları konularının başında gelmektedir.

Modifikasyon; bitümlü bağlayıcı veya bitümlü karışımlara katkı maddeleri ilave ederek reolojik özelliklerinin geliştirilmesi işlemidir. Karayolu idarelerince bitümün modifiye edilerek kullanılmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bu durumun ana nedenlerinin başında petrol rafinerilerinin petrolü elde etme ve işleme aşamalarındaki değişimler gelmektedir. 1973 yılındaki petrol ambargosunun sonrasında geleneksel kaynaklar değişmiş, tek bir hammadde kaynağına bağlı olan birçok rafineri birden fazla kaynaktan gelecek olan ham petrolü işlemek zorunluluğuyla karşı karşıya kalmıştır. Bu değişimler üstyapı karışımlarında kullanılacak penetrasyon bitümlerinde aranan niteliklerin karşılanmasını zorlaştırmıştır. Tüm bu koşullar, bitümlerin modifiye edilerek istenilen niteliklere dönüştürülmesi için zorlayıcı olmuştur (Gürer 2014).

Bu tip bozulmalar yol kaplamalarının servis ömürlerinin, ulaşım konforunun azalmasına neden olmakta ve bozulmaların seviyesine bağlı olarak trafik güvenliği ve sürüş konforu

açısından çeşitli riskleri barındırmaktadır. Ayrıca yolun servis ömrü boyunca sık bakım/onarım işlemlerine ihtiyaç duyması, gerekli görüldükçe yenilenmesi de kısa vadede yüksek maliyetler oluşturmaktadır. Asfalt kaplamalarda kullanılan bitümlü bağlayıcı değişken iklim ve trafik şartlarında yeterli olmayabilir ve güçlendirilmeye ihtiyaç duyabilir. Esnek üst yapıların performansını arttırmak ve asfalt kaplamanın servis ömrünü arttırmak için yapılan çalışmalarda, katkı maddeleri, bitümüm ve asfalt karışımların özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu sebeple bitüm/bitümlü karışımlar modifiye edilerek iklim ve bölge şartlarına uygun bir yol üst yapısı oluşturulabilir. Giderek üstel bir şekilde artan taşıt sayısı da bitümün modifiye edilerek kullanılmasını artık zorunlu kılmaktadır.

Modifiye bitümlerin kullanımı, tüm esnek üstyapı karışım dizaynlarındaki asfaltın performansını arttırmak için çok iyi avantajlar sağlamaktadır. Bunlar:

- İşlenebilirliğin artırılması,
- Yüksek çekme direnci,
- Suya hassasiyetin azaltılması,
- Yorulma ömrünün uzatılması,
- Yapışma kabiliyeti artırılması,
- Yaşlanmanın azaltılması,
- Tekerlek izi deformasyonu oluşumuna karşı daha yüksek dayanım vb.'dir.

Saf bitüm ile üretilen kaplamalar olumsuz trafik ve çevre koşullarına karşı dayanamayabilir. Dolayısıyla, araştırmacılar bu sorunu gidermek, güvenilir ve ekonomik bir alternatif sunmak için bitümün mekanik ve reolojik özelliklerini farklı katkı maddeleri ile modifiye ederek iyileştirmeyi denemektedirler. Bitüm ve bitümlü karışımlar; sıcaklık farklılıklarında oluşan deformasyonları azaltmak, kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek, agrega-bitüm adezyonunu arttırmak, düşük kaliteli agregaları kullanılabilir hale getirmek, yaşlanmış bağlayıcıyı gençleştirmek, üstyapı tabaka kalınlıklarını azaltmak gibi nedenlerle modifiye edilir.

Bitümün modifiye edilmesi, saf bitümlü bağlayıcının geleneksel özelliklerinin değiştirildiği ve böylece sürdürülebilir ve potansiyel açısından kaliteli ve tatmin edici bir performans sergileyebilen, istenilen özelliklerdeki kaplamaların elde edildiği en iyi alternatif olarak görülmektedir. Bitümlü karışımlar farklı tip modifikasyonlarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bunlar bağlayıcı ve karışım modifikasyonudur (Gürer 2014, Hunter ve Self 2015). Fakat bu kullanılan modifikatör maddeleri yurt dışı kaynaklı ve patentli ürünler oldukları için birim fiyatları oldukça yüksektir. Zaten bitümlü bağlayıcı birim fiyatı oldukça yüksek iken bu tip modifikatörlerin ilave edilmesiyle bitüm birim fiyatları daha da yükselmekte bu da karayol idarelerini zor durumda bırakmaktadır. İşte bu gibi nedenlerden dolayı diatomit gibi yerel ve doğal kaynakların modifikatör olarak kullanılmasıyla bitümlü bağlayıcı özellikleri geliştirilebilir. Bu sayede yol kaplamalarından daha yüksek performans elde edildiği gibi servis ömürlerinin de artması sağlanmış olunacak, daha az bakım onarım gerektirecek ve ithal katkı maddelerine olan bağımlılığın da azalması sağlanacaktır.

Son yıllarda diatomitin çeşitli kullanım alanlarına yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Literatürde sınırlı sayıda çalışma, diatomitin bitüm modifikasyonunda ve bitümlü karışımlarda mineral filler olarak kullanımıyla ilgilidir. Fakat literatür incelendiğinde, yalnızca diatomit kullanılarak Seydiler (Afyonkarahisar) bölgesi diatomitleri ile bitüm modifikasyonu üzerine bir araştırmanın daha önce yapılmadığı görülmüştür.

Bölgedeki en önemli çalışma Yıldız (1997) tarafından yapılmış olup, araştırmacı bölgedeki diatomitlerin genel jeolojik özellikleriyle mineralojik petrografik ve jeokimyasal bileşimini araştırmış ve bu diatomitlerden ısı izolasyon tuğlası üreterek, tuğla örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini ortaya koymuştur. Bunun dışında Seydiler diatomitleriyle yapılmış ayrıntılı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu tez çalışması ile ilk kez, Seydiler (Afyonkarahisar) bölgesinde yaygın olarak bulunan dört farklı tabakadaki diatomitlerden numune alınmış, önce karakterizasyon çalışması (diatomiti mineralojik özellikler, kimyasal bileşimler, partikül büyüklüğü dağılımı, gözenekli dağılım, morfoloji ve SEM görüntüleri vb.) daha sonra da 75 mikron altına öğütülerek elde edilen bu malzemelerin farklı oranlarda (%7- 12 ve 17) bitüm

modifikasyonu yapılmıştır. Bu suretle Seydiler (Afyonkarahisar) Bölgesinde diyatomitlerinin bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki potansiyel etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları farklı tabakalardaki diyatomitlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların, viskozite, dinamik kesme reometresi, yaşlanma vb. reolojik özelliklerin nasıl etkilendiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak kullanılan diyatomit katkı bitümlerin reolojik özelliklerinin geliştiği görülmüştür.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

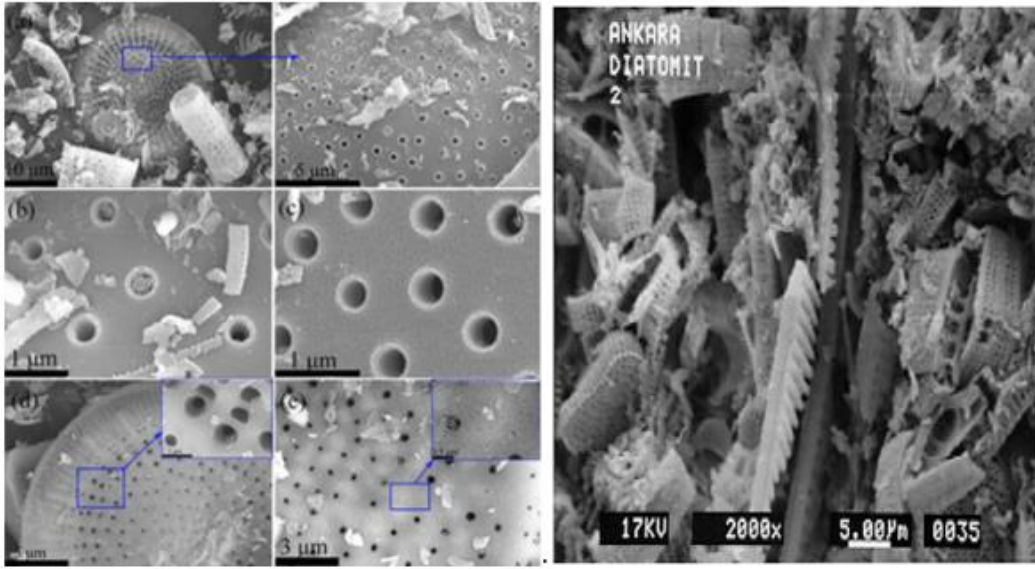
Yapılan literatür özeti üç farklı alt bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde diyatomit organik çökelinin genel özellikleri, ikinci bölümde esnek yol üstyapı kaplamaları modifikasyonu ve üçüncü bölümde ise diyatomitin bitüm ve bitümlü karışımlarda kullanımıyla ilgili olarak daha önce yapılmış çalışmaların özetleri verilmiştir.

2.1 Diyatomit

Diyatomit, silisli algler (diyatomeleler) olarak adlandırılan ökaryotik, tek hücreli, mikroskobik alglerin fosilleşmiş silisli kabuklarından meydana gelen organik bir çökeldir. Diyatomit açık sarı renkten kahverengiye kadar çeşitli renklerde bulunabilir. Genel olarak taşın yüzeyi parlak beyaz renktedir. Bir organizma öldüğünde tortu şeklinde çöker ve organik kısmı çürüyerek kaybolur. Bu şekilde silisli kavrıklar birikerek taşlaşır ve diyatomit yataklarını oluştururlar. Diyatomitler denizlerde, göl ve nehir yataklarında, ıslak kayalarda nem ve ışıkla beslenerek gelişmektedirler. Diyatomit biyolojik kökenli tek doğal mineraldir ve fosil unu, filis unu, dağ unu, beyaz turba, kizelgur, pekmez toprağı gibi isimlerle de anılırlar (İnt. Kyn.1).

İngilizce literatürde “Diyatomit” veya “Diyatome toprağı” olarak yer alan bu organik kökenli mineral, Almanca ve Fransızca literatürde “Kizelgur” adı ile geçmektedir. Diyatomitler biyolojik, ekolojik ve ekonomik yönden büyük öneme sahip, her türlü sulu ortamda yaşayabilen fotosentetik alglerdir. Diyatomelelerin hücre çeperlerinde silisyum olması onlara diğer algler arasında karakteristik bir özellik kazandırır. Suda erimiş silis oranının birden artması diyatomelelerin yaygınlaşmasına, öldükten sonra kabukların çözülmemesine ve diyatomit oluşumuna yol açmaktadır. Deniz, göl ve durgun nehir yataklarında çökelen bu rezervler, yer kabuğı hareketleri ile yükselerek beyaz görünümlü tepecikleri meydana getirmektedir. Diyatomitin bileşimi ve özellikleri nedeniyle çoğunlukla okyanusta, göllerde biriken biyojenik silisli tortul kayaçlardır. Mikroskobik bitkiler (tek hücreli algler) kalıntıları ve 10 milyon ila 15 milyon yıl önce biriktirme madeninde sızıntı konsolidasyonu az miktarda Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 ve organik madde içeren amorf elementel kükürt dioksit oluşmaktadır. Diyatomit,

göl veya deniz tortularında ölü diatomların (mikroskopik tek hücreli algler) amorf silika (opal, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) kalıntılarının birikmesiyle oluşur. Fırında kurutulmuş diatomitin tipik kimyasal bileşimi % 80-90 silis olup, % 2-4 alümina ve % 0,5-2,0 demir oksittir (Fe_2O_3). Partükül boyutu, 3 μm 'den küçük ila 1 mm'den fazla, ancak tipik olarak 10 ila 200 μm arasında değişir. Tanecikliliğine bağlı olarak, bu toz, süngertaşı tozuna benzer şekilde aşındırıcı bir hisse sahip olabilir ve yüksek gözenekliliğinin bir sonucu olarak düşük bir yoğunluğa sahiptir (İnt.Kyn.2)(Resim 2.1 ve Resim 2.2).



Resim 2.1 Diatomit mikroyapısı (Kaşak 2007, İnt.Kyn.2).



Resim 2.2 Diatomit yatağı (Afyonkarahisar, İnt. Kyn.2).

Diyatomitin özel bileşimi ve yapısı, yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı, güçlü adsorpsiyon düşük ışık, güçlü, ses yalıtımı, ısı yalıtımı, aşınmaya dayanıklı, asit ve ısı iletimi, toksik olmayan, kirletmeyen özelliklere sahiptir. Diyatomit, gelişmiş bir mikro gözenekli yapıya sahip olduğu, bol bir kaynak ve düşük maliyetli olduğu için asfalta ilave edilmeye uygun bir malzemedir. Diyatomitin bitüm adsorpsiyonu sadece diyatomitin gözenek yapısı ve yüzey kimyasal özelliği tarafından belirlenmekle kalmaz, aynı zamanda bitümün bileşiminden de etkilenir. Diyatomit ve bitüm arasındaki etkileşimi göstermek ve pratik uygulama için temel verileri sağlamak gerekir. Diyatomit iyi uyumluluk, karıştırma sıcaklığı, üniform bir karışım oluşturmak için asfalta üniform olarak dağıtılabilir ve iyi bir stabiliteye sahiptir. Diyatomitlerin yaşam döngüsünü tamamlaması ile silisli kabukları bir araya toplanarak çökelmekte ve diyatomit rezervlerini oluşturmaktadır. Çok aktif diyatomit kolonileri yılda birkaç mm kalınlıkta bir çökme hızına ulaşabilmektedir. Tür ve çoğalma hızları arasındaki farklılıklara rezervin olduğu ortam şartları da eklendiğinde, çökme hızı yılda 0.1-4 mm arasında değişebilmektedir. Diyatomitin 1 cm³ 'ünde her biri 0.0001-4 mm çapında olan 1-30 milyon adet diyatomit kabuğu ve bu kadar da gözenek bulunmaktadır. Doğada bulunduğu şekil ile diyatomit aşırı miktarda su içerir ki, bu oran %10 ile %60 arasında değişir. Kuru diyatomitin özgül ağırlığı 0,34 – 0,67 gr/cm³ gelmektedir. Diyatomit ayrıca 1000 °C ile 1750 °C arasında değişen yüksek bir erime noktasına sahiptir. Organik madde içeren yataklar çok farklıdır. Dolayısıyla diyatomitlerin rengi çok açık renkli, gri ve kahverengine kadar değişir. Toz haline getirilmiş diyatomit ürünlerinin özgül ağırlığı 1,90 – 2,35 gr/cm³ arasında değişir (Kaşak 2007).

Diyatomeler ilk defa 135-65 milyon yıl önce Kretase çağında çok büyük miktarlara ulaşmışlar ve bugün ticari değeri olan diyatomit yataklarının çoğunu ise Miyosen çağında (27-7 milyon yıl önce) meydana getirmişlerdir. Dünya'da diyatomit üretim teknolojisi 1930 yılından başlayarak gelişmiş; filtre yardımcısı malzemesi, dolgu maddesi, izolasyon ve refrakter malzemesi olarak ve spesifik kullanım amaçlarına uygun nitelikte diyatomit üretimi gerçekleştirilmiştir. Diyatomitlerin çimentolu sistemlerde kullanılmaya başlaması ise 1950'lerden sonra gerçekleşmiştir. Türkiye'de diyatomit üretimine yönelik çalışmalar Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. bünyesinde 1955 yılında başlamıştır. Diyatomit, çok geniş kullanım alanına sahip biyolojik orijinli tek doğal mineral olup, yüksek

gözenekliliği, hafifliği, ısı, ses ve elektriği az geçirmesi, kimyasal maddelere dayanıklılığı, yoğunluğunun az olması gibi fiziksel özellikleri nedeniyle dolgu maddesi, hafif yapı malzemesi, yalıtım malzemesi, refrakter malzeme, çimento puzolanik malzemesi, absorban, vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (İnt.Kyn.1). Ayrıca, Boya, diş macunu, plastik, ilaç, cila, temizlik, vb. üretimde kullanılmaktadır. En fazla filtrasyon alanında kullanılır, bunu dolgu alanındaki kullanımı da izlemektedir. Diyatomitin bir başka kullanım alanı ise, kirli suların temizlenmesinde süzgeç görevi yapar ve bir çeşit doğal arıtma görevi görürler. Aynı şekilde, özellikle ağır metal gideriminde oldukça olumlu sonuçlar alındığı tespit edilmiştir. Diyatomit çevre kirliliğini azaltmak, doğal kaynak tüketimini azaltmak ve bitümlü kaplamaların karışım performansını iyileştirmek amacıyla yaygın olarak bitümlü karışımı için kullanıldığı dünyada büyük ilgi görmüştür. Üretilen ürünün özelliklerine ve performansına olumlu katkılar sağlamaktadır. Özellikle inşaat malzemesi olarak betona %3 oranında karıştırıldığında basınç direncini %20 çekme direncini ise %10 arttırdığı görülmüştür (Çubuk 1998). Isı, ses ve elektrik iletkenliğinin oldukça düşük olması nedeniyle; hafif çimento, çatı ve cephe kaplama sıvalarında da kullanılmaktadır. Dünyanın birçok bölgesinde bulunan diyatomit yataklarının yanı sıra Türkiye’de de bugüne kadar tespit edilmiş olan yataklar mevcut. Bu yataklardan bazıları şunlardır.

- 1) Ankara: Gürcü köyü,
- 2) Çanakkale: Keçialan köyü,
- 3) Çankırı: Akhasan köyü,
- 4) Denizli: Karakıran köyü, Tırkaza köyü,
- 5) Kütahya: Alayunt köyü,
- 6) Uşak: Kayagil köyü,
- 7) Kayseri: Hırka köyü,
- 8) Afyonkarahisar: İsehisar İlçesi Seydiler kasabası,

Dünya’da en büyük diyatomit rezervi Avrupa’dadır. Bunu Amerika izlemektedir. Türkiye’nin diyatomit rezervi 125 milyon tondur. Hırka (Kayseri) Türkiye’nin bilinen en büyük diyatomit yatağıdır (106 milyon ton). Türkiye’de zengin diyatomit kaynakları bulunmasına rağmen, bu hammadde etkin bir biçimde kullanılamamaktadır. Bunun

sebebi ise bu ham maddenin iyi bilinmemesidir. Diyatom toprak kaynakları açısından zengin, düşük üretim maliyeti, kirlilik içermeyen, kolay işlenebilir, bitümle karıştırılması basittir, herhangi bir özel ekipman gerektirmez, diyatomitle modifiye edilmiş bitümlerin inşaat süreci normal asfalt kaplamalarla benzerdir (Çetin ve Taş 2012) .

2.2 Asfalt Kaplamalar ve Modifikasyon

Ulaşım, insanların ve eşyaların yararlı olduğu varsayılan bir amaca yönelik yer değiştirmeleridir. Ulaşımın kaliteli bir şekilde gerçekleşmesi için bazı parametreler vardır. Bunlar konforlu olması, hızlı gerçekleşmesi, güvenli olmasıdır. Ulaştırma sistemleri içinde karayolu ulaştırmasının ayrı bir önemi bulunmaktadır. Tarihin en eski ulaşım modu olan karayolu, aslında ulaşım altyapısının temelini teşkil etmektedir. Taşınacak yükün türü, miktarı açısından coğrafi koşullar ve zamana göre en esnek, kolay ve hızlı taşıma imkânı vermesi sebebiyle birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de karayolu ulaştırması, ulaştırma türleri arasında en çok tercih edilen olmuştur. Karayolu, insan ve çevre ilişkilerinde en önemli rol oynayan, yerleşim alanlarını birbirine bağlayarak sosyal, kültürel ve ekonomik alanlarda etkili olan mühendislik yapılarıdır.

Ülkemizde karayollarında uygulanan üstyapı kaplama türü, bitümlü karışımlardan yapılan esnek yol üstyapılarıdır. Karayollarında kullanılan malzemeye göre: esnek üstyapılar, rijit üstyapılar ve kompozit üstyapılar olarak 3 ana gruba ayrılır. Ülkemizde ve dünyada tasarım, yapım, bakım ve onarım rahatlığı göz önünde tutularak genelde esnek yollar kullanılır. Esnek üst yapı; yapılan veya yapılacak bölgede şartlarına uygun olarak seçilen belirli penetrasyon derecesine sahip bitüm, tasarım şartlarına uygun gradasyona sahip ince ve kaba agrega, mineral filler ve istenirse katkı malzemelerinden oluşur.

Esnek üstyapılar, neredeyse dünyanın her yerinde yol üstyapılarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Aafalt kaplamaların rijit kaplamalar yerine tercih edilmesi, geri dönüşümlü, esnek, karşılaştırmalı olarak daha düşük maliyetle inşa edilebilir ve trafik için yumuşak ve konforlu sürüşü kolaylaştıran sebeplere dayanmaktadır.

Yol üst yapılarında en çok kullanılan asfalt kaplamalar başlıca bitümlü bağlayıcı ve agregadan meydana gelmektedir. Esnek kaplamaların niteliğini belirleyen en önemli etken ise kaplamayı meydana getiren bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemelerin özelliğidir. Son yıllarda, yol üstyapılarında adezyon eksikliği, tekerlek izi oluşumu, çatlamlar ve soyulmalar gibi deformasyonlardan kaynaklanan sorunlar sıkça görülmektedir. Bu nedenle esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan kusurların giderilmesinde modifiye bitüm kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

Bitüm, temel olarak hidrokarbonlar ve türevlerini içeren, trikloretilen içerisinde çözülebilen viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bir asfalt tesisinde, gradasyonu kontrollü bir şekilde ayarlanmış agrega ile uygun miktarı tayin edilmiş bağlayıcının sıcak olarak karıştırılması ile elde edilmektedir. Yüksek standartlı karayolları, otoyolları ve havaalanlarında yapılacak esnek üstyapılar için bitümlü sıcak karışımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların yüksek kalitede imal edilmeleri gerektiği için stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma, işlenebilirlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin tümünü ideal olarak sağlayabilecek karışım tasarımlarının yapılması büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla, bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri sebebiyle yol üstyapılarında tercih edilmekte olup, esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli olmaları için de pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalardan en önemlisi ise bitümün modifiye edilerek asfalt kaplamaların performanslarının artırılması çalışmalarıdır.

Ekonomik kalkınma ve yaşam standartlarının yükselmesi ile toplumların konforlu, güvenli sürüş kalitesi talebi, yol üstyapılarının daha yüksek performanslı ve bozulmalara karşı daha dirençli olarak tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu durumda dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamalar için bitüm modifikasyonu en önemli seçenek olarak mühendislerin karşına çıkmaktadır.

Yıllarca, bitümlü karışımlarda adezyon özelliklerini sağlamak için tek yaklaşım olarak, agrega ile bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Asfalt kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım onarım maliyeti ve

gereksiniminin daha az olması arzulanmaktadır. Bu nedenle de asfalt kaplamaların en önemli bileşeni olan bitümlü bağlayıcının modifiye edilerek asfalt kaplamaların performansları arttırılmaya çalışılmaktadır.

Trafik yoğunluğunun hızla artması nedeniyle, yol kaplamalarında tekerlek izi, termal çatlama ve su hasarı gibi kaplamada çeşitli bozulmalara neden olur. Bitümlü karışımlarının modifikasyonu, hasarlarını azaltmak ve asfalt kaplamanın performansını arttırmak için en yaygın çözümdür. Son yıllarda, artan taşıt sayısı ve trafik etkisiyle yol üstyapılarında adezyon eksikliği, tekerlek izi deformasyonu oluşumu, çatlama ve soyulmalar gibi deformasyonlardan kaynaklanan sorunlar sıkça görülmektedir. Bu nedenle asfalt kaplamalarda meydana gelen kusurların giderilmesinde modifiye bitüm kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Çubuk 2007). Asfalt kaplamalarda, bitümlü karışımlarda bağlayıcı madde olarak işlev gören geleneksel bitüm, sürdürülebilir kaplama yapımı için yeterli olmayabilir ve güçlendirmeye ihtiyaç duyabilir. Bu durum, araştırmacıların ve yol otoritelerinin, kaplamaların belirli bir asfalt kaplama hizmet ömrü boyunca meydana gelen problemlere dayanıklılığını sağlamak için güvenilir ve aynı zamanda ekonomik alternatif bir yol bulma arayışına ilham vermiştir. Bitümün modifiye edilmesi yaklaşımı, saf bitümlü bağlayıcının geleneksel özelliklerinin değiştirildiği ve böylece sürdürülebilir ve potansiyel olarak tatmin edici bir performans sergileyebilen, istenilen özelliklerdeki kaplamaların elde edildiği en iyi alternatif olarak görülmüştür (Hunter ve Self 2015).

Trafik hacimlerinde meydana gelen artış asfalt kaplamalarda farklı ve erken bozulmaların oluşmasına neden olmakta, bu da araştırmacıları daha uzun ömürlü bitümlü karışım yapma yöntemlerini araştırmaya teşvik etmektedir. Bunun neticesinde bitümün veya bitümlü karışımların modifiye edilmesi en önemli konulardan biri haline gelmiştir (Firoozifar vd. 2010, Hunter ve Self, 2015).

Günümüzde petrol rafinerilerinden daha az bitümlü bağlayıcı üretilmektedir. Bu durumun ana nedeni; petrol rafinerilerinin petrolü elde etme ve işleme aşamalarındaki değişimlerdir. 1973 yılındaki petrol ambargosunun sonrasında geleneksel kaynaklar değişmiş, tek bir ham madde kaynağına bağlı olan birçok rafineri birden fazla kaynaktan

gelecek olan ham petrolü işlemek zorunluluğuyla karşı karşıya kalmıştır. Tüm bu değişimler üstyapı karışımlarında kullanılacak penetrasyon bitümlerinde aranan niteliklerin karşılanmasını zorlaştırmıştır. Bu durum bitümlerin modifiye edilerek istenilen niteliklerin sağlanması zorlayıcı olmuştur. Bitüm modifikasyonunun maliyeti yüksektir. Fakat uzun dönemde işlevselliğin artacağı bunun da maliyetin azalmasına neden olacağı düşünülmektedir. Bitümlü bağlayıcı ve karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilginin artmasında etkili olan başlıca unsurlar:

- Ham petrol ve bitüm fiyatlarında her zaman artış tehlikesi vardır.
- Yüksek maliyetler daha ince kaplamaların inşa edilmesi eğilimini doğurmuş, bu durumda da hizmet ömürlerinde düşüşler görülmüştür.
- Trafik yüklerindeki önemli artışlar olmuştur.
- Yakıt dökülmesi gibi özel durumlara karşı dayanımın artırılması gereksinimleri olmuştur.

Dolayısıyla bitüm ve bitümlü karışımlar; sıcaklık farklılıklarında oluşan deformasyonları azaltmak, kayma direnci yüksek zeminler elde etmek, agrega bitüm adezyonunu arttırmak, düşük kaliteli agregaları kullanılabilir hale getirmek, yaşlanmış bağlayıcıyı gençleştirmek, üstyapı tabaka kalınlıklarını azaltmak vb. nedenlerden dolayı modifiye edilmeleri gerekir. Bir diğer neden de her geçen gün artan yol ağları ve karayol idarelerinin bakım onarım periyotlarının azaltılarak işletme maliyetlerinin azaltılması kaygısıdır. Trafik hacmindeki ve ağır dingil yüklerindeki artışlar, üretim hataları ve iklim koşulları, yollarda tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları ve suya karşı duyarlılık gibi bozulmalara sebep olmakta, bu durum da yolun öngörülen ömür ve konfor düzeyini düşürmektedir. Genel olarak asfalt kaplamalarda görülen başlıca bozulma tiplerinden plastik deformasyonlar (ondülasyon, tekerlek izinde oturma, yorulma gibi) gerek trafik emniyeti açısından gerekse artan onarım maliyeti nedenleri ile büyük sorunlar yaratmaktadır. Bu tür sorunlara çözüm bulmak için, bitümlü bağlayıcıların iyileştirilmesi (bitüm modifikasyonu) çalışmaları yapılmakta ve bu çalışmalarda bitümlü bağlayıcılara ve karışımlara çeşitli katkı maddeleri belirli oranlarda katılarak, malzemeye kazandırıldığı özellikler incelenmektedir (Hunter ve Self 2015). Modifiye edici katkı maddelerinin kullanım amacı, bitümlü bağlayıcı ve karışımların

davranışlarının iyileştirilmesidir. Son yıllarda hız kazanan modifiye bitüm ve modifiye karışım çalışmaları, farklı katkı maddelerinin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki performans etkilerini tespit etme konusunda yoğunlaşmıştır (Laukkanen vd. 2018 , Kaya vd. 2019, Cao vd). Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere göre katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımlara (BSK) olumlu etkileri ve her birinin diğerlerine karşı üstün yönleri ortaya konulmuştur (Hassanpour-Kasanagh vd. 2020, Şengöz vd. 2008, Kök vd. 2011). Söz konusu malzemelerden, bitümlü bağlayıcılar, viskoelastik davranış özellikleri nedeni ile yol üstü yapısı performansının belirlenmesinde çok önemli rol oynadığından; bitüm modifikasyonu gündeme gelmiştir. Modifiye bitümün geleneksel bitüme göre reolojik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Dolayısıyla bitümü modifiye etmenin bir diğer sebepleri ise ;

- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde edilmesi ve bunun yardımıyla kalıcı deformasyonların azaltılması,
- Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışım elde etmek ve bunun yardımıyla tekerlek izi oluşumunu azaltmak,
- Kayma direnci yüksek yüzey elde etmek,
- Karışımların stabilite ve mukavemetini arttırmak,
- Karışımın yorulma direncini arttırmak,
- Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,
- Düşük kalite agregaları kullanılır hale getirme,
- Agregada daha kalın film yüzeyi oluşturarak, bağlayıcı ve agrega arasındaki tutunmayı arttırarak soyulmayı azaltma,
- Kaplama tabakası kalınlığını azaltıp, daha ince aşınma tabakası kullanımının sağlanması, çatlak oluşumu geciktirme, kuma gibi olayları azaltma, performansını arttırma, kaplamaların uzun vadede ekonomik ve dayanıklı olmasını sağlamaktır.

Modifikasyon işlemi genellikle iki türlü yapılır;

- Katkı maddesi bitüme katılarak (modifiye bitüm) elde edilmesi,

- Katkı maddesi asfalt pletinde doğrudan doğruya karışıma katılarak modifiye karışım elde edilmesi,

Modifiye edilmiş karışımların ve modifiye edici katkı maddelerinde aranan özellikler ise;

- Kolay elde edilebilmelidir,
- Bitümle karıştırma sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
- Bitümle homojen olarak karışabilmelidir,
- Düşük sıcaklıklarda asfaltı kırılğan yada sert hale getirmemelidirler,
- Maliyetleri ekonomik olmalıdır.

Bitüm, tüm bitümlü karışımların viskoelastik özelliklerinden sorumlu olduğu için, üstyapının performansı üzerinde önemli bir rolü vardır. Bir modifikatörün ana rollerinden birisi de, karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, başka sıcaklıklardaki bitüm veya karışım özelliklerini olumsuz etkilemeksizin, arttırmaktır. Bitümlü karışımlarda adezyon özelliklerini sağlamak için tek yaklaşım olarak, agrega ile bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Asfalt kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım–onarım maliyeti ve gereksiniminin daha az olması arzulanmaktadır. Dolayısıyla; karayolu üstyapılarının mevcut iklim ve trafik koşullarına göre performansı, yani en az bakım maliyetleri ile en uzun süre ve en konforlu bir şekilde hizmet verebilme kabiliyetleri, önemli derecede bu koşullara uygun sınıfta bitümün kullanılmasına bağlı olmaktadır (Güngör.vd 2019), bitüm modifikasyonunda kullanılan modifikatörlerin bazıları bazıları ise;

- Filler : kil, uçucu kül, taş tozu, kireç, karbon siyahi
- Plastomer : PE, PP, PVC, EVA, epoksi reçineleri
- Elastomer : SBR, SBS, doğal kauçuk
- Fiberler : polyester, poliporan
- Soyulma önleyici : aminler, amidler
- Ekstender : ligrin, sülfür
- Anti-oksidanlar : aminler vb'dir.

2.3 Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

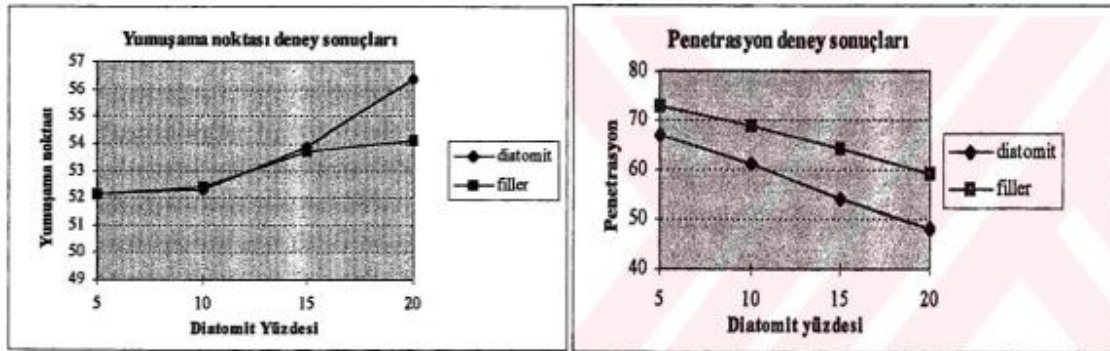
Kietzman ve Rodier (1984), diyatomit fillerin, asfalt kaplamaların performansına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında diyatomiti Houston, Calgary ve Los Angeles'taki ağır trafik altındaki kaplamalarda kullanmışlardır. Bu kaplamalar tipik olarak, bitüm içeriğinde bir artış olsun veya olmasın, yüksek yoğunluğa, son derece düşük geçirgenliğe ve düşük bir başlangıç bitüm sertleştirme oranına sahiptir. Çalışmada, EXXON AC-10 (104 penetrasyon sınıfı) bitüm kullanılmıştır. Yapılan performans değerlendirmesi; tekerlek izi deformasyonu, çatlama, yüzey aşınması, yüzey sürtünmesi gibi görsel yüzey etkilerini, yoğunluk boşlukları, geçirgenlik ve bitüm sertleştirme gibi dahili etkileri içermektedir. Yüksek hacimli diyatomit, %2,0 ila 4,8 diyatomit ve %11,0 ila 15,0 bitüm (diyatomit) ile test edilmiştir. Yapılan deney sonuçları tekerlik izi deformasyonunu, çatlama direncini ve yüzeyin sürtünme özelliklerini iyileştirildiğini göstermiştir.

Çubuk (1998), katkı maddesi olarak diyatomitin, bitümlü sıcak karışımların davranışları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ülkemizde, trafik hacmi ile beraber trafik yüklerinin de artması ve iklim koşullarının olumsuz etkileri, üstyapı kaplamalarında, tekerlik izi oluşumu, ondülasyon gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tür sorunları ortadan kaldırmak ve kaplama performansını iyilestirmek amacıyla, bitümlü bağlayıcıların modifiye edilerek asfalt betonunun yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyonlarını azaltmak, yol kapamasının yorulma ömrünü uzatmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada, diyatomit ile modifiye edilmiş olan asfalt betonu karışımlarının, Marshall stabiletisi ve esneklik modülleri incelenmiştir. Diyatomit asfaltın performansını arttırmak için çok iyi avantajlar sağlamaktadır. Bunlar;

- İşlenebilirliğin artması,
- Sağlamlığın artması,
- Yorulma ömrünün artması,
- Yapışma özelliği,
- Tekerlik izi oluşumuna karşı ve deformasyonlara karşı daha yüksek dayanım,
- Yaşlanmanın azaltılmasıdır,

Bu tez çalışmasında, 400' e yakın standart Marshall deney numuneleri üzerinde değişik bitüm yüzdelerinde (%6,5, %7,0, %7,5, %8,0, %8,5, %9,0) bitüm miktarı / diyatomit + agrega (1100gr) miktarı, katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, diyatomit %1,0, %1,5, %2,0, %2,5, %3,0 değişik oranlarda eklenmiştir. Daha sonra hazırlanmış olan asfalt karışımının üzerinde yukarıda sözü geçen problemleri ortadan kaldırmak veya ne derecede önlediğini belirlemek amacıyla bir dizi deneyler uygulanmıştır. Aynı şekilde, bu çalışmanın ikinci aşaması olarak, 60/70 penetrasyon sınıfı olan bitüm Kırıkkale Rafinesinden temin edilmiştir. Katkı maddesi olarak, diyatomit %5, %10 %15, %20 farklı oranlarda bitüme ilave edilerek karışım hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanmış olan karışımın üzerinde, bahsedilen deneyler ile incelenmiştir.

Yapılan deneylerinin penetrasyonu ve yumuşama noktası sonuçları Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları (Çubuk 1998).

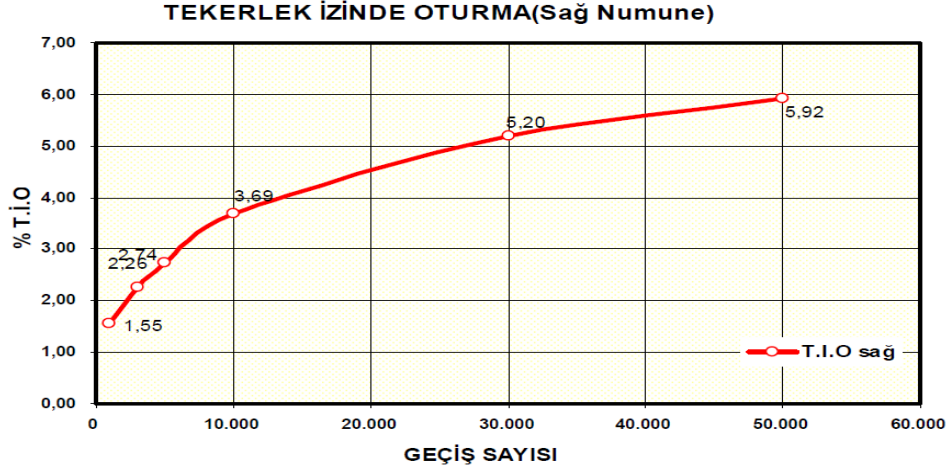
Yapılan deneyler neticesinde görülmüştür ki, bitüm içersine diyatomit katıldığında, (%5, %10, %15, %20) orandaki fillere göre diyatomit katkı oranı %15' e kadar aynı sonuçlar elde edilmiş %15'ten sonra ise penetrasyon ve yumuşama noktasında daha uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

Kaşak (2007) taş mastik asfalt karışımında (TMA) katkı maddesi olarak fiber yerine diyatomitin uygulanabilirliğini araştırmıştır. Tez konusu olarak düşünülen diyatomit katkılı TMA karışımların uygulanıp uygulanamayacağını araştırmaları, ülke ekonomisine sağlayabileceği katkıların belirlenmesi ve uygulanabilirliği açısından

önemlidir. Dolayısıyla bu çalışmada, çeşitli kalite kontrol deneyleri ile diyatomitin TMA karışımlarında iyi sonuç verip vermeyeceği araştırılmıştır. Fiberli ve diyatomit katkı TMA karışımların birbirleriyle kıyaslaması yapılmıştır. TMA karışımların hazırlanmasında kullanılan malzemeler; iki ayrı tipte agrega, bitümlü bağlayıcı, diyatomit malzemesi, fiber katkı malzemesidir. Çalışmada 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Yapılan deneylerde seçilen TMA gradasyonu göz önünde tutularak iki farklı katkı malzemesi kullanılmıştır. Bunlar; bitümlü selülozik fiber (BSF) ve diyatomittir (DİA). Bu iki katkı maddesi kullanılarak üretilen TMA karışımların özelliklerinin belirlenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması açısından çeşitli performans belirleyici deneyler yapılmıştır. Bu yapılan deneylerden en önemlileri. TMA karışımlardaki oluşan plastik deformasyonların belirlenmesi amacıyla kullanılan tekerlek izinde oturma deneyi ve üretilen karışımların uygulanan tekrarlı yük altında yorulma kırılmasına karşı direncini belirleyen deneylerdir.

- 1- Marshall yöntemi ile dizayn,
- 2- Bitüm süzülme deneyi,
- 3- Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci için standart deney yöntemi,
- 4- Tekerlek izinde oturma deneyi,
- 5- Tekrarlı yük altında yorulmaya karşı direnç dayanımı,

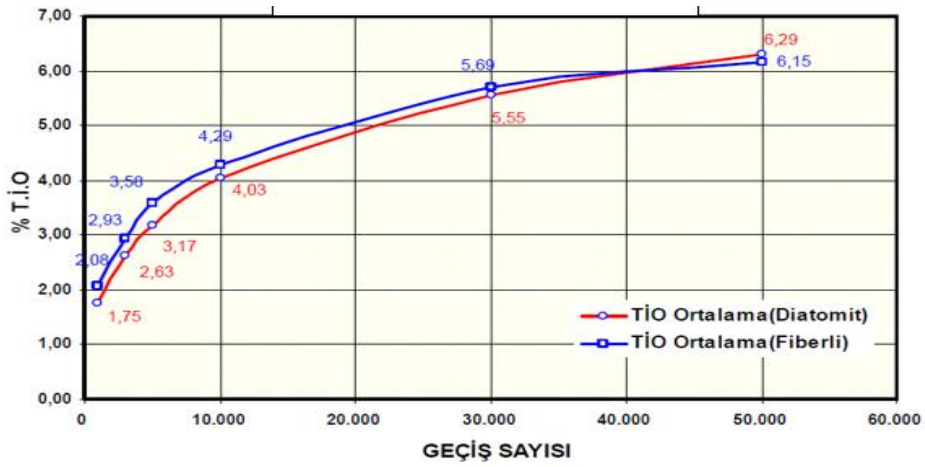
Bu amaç kapsamında diyatomitli ve fiber katkı TMA karışımlar üzerinde beş farklı performans deneyi yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan ve deney bulgularından yola çıkarak elde edilen sonuçların bazıları Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4'da ve Çizelge 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Diatomit katkıli tekerlek izinde oturma numunesi (sağ tekerlek) üzerinde oluşan tio%'si miktarı (Kaşak 2007).



Şekil 2.3 Diatomit katkıli tekerlek izinde oturma numunesi (sağ tekerlek) üzerinde oluşan tio %'si miktarı (Kaşak, 2007).



Şekil 2.4 Tekerlik izinde oturma tayını geleneksel karşılaştırma (Kaşak, 2007).

Çizelge 2.1 Tekerlek izinde oturma deney sonuçları (Kaşak 2007).

Tekerlik izinde oturma tayini deneyleri ortalama sonuçları			
Karışım Tipi		%3 Diyatomitli Karışım	%0.45 Fiberli Karışım
Optimum Bitüm %'si		6,45	6,55
DP dizayn		2,464	2,467
DP numune		2,400	2,392
Sıkışma %'si		97,3	97,00
TEKERLEK İZİNDE OTURMA %'si	Devir Sayısı	TİO	TİO
	1000	1,75	2,08
	3000	2,63	2,93
	5000	3,17	3,58
	10000	4,03	4,29
	30000	5,55	5,69
50000		6,29	6,15

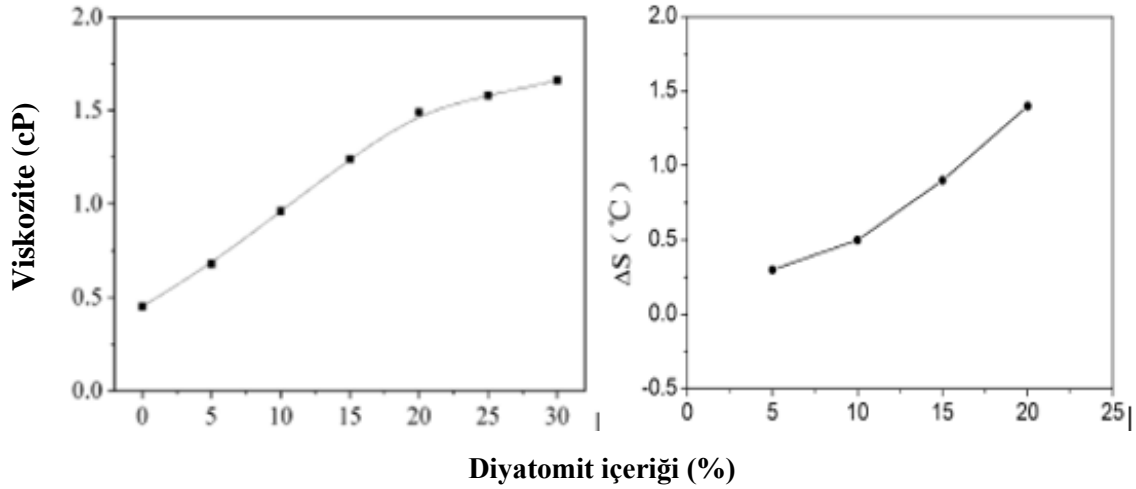
Laboratuvar ortamında yapılan deneylerin sonuçlarına göre yorulma dayanımı hariç sorun çıkartabilecek değerler elde edilmemiştir. Fakat diyatomitin TMA karışımlar içinde uygulanabilirliğinin kararını verebilmek için en güzel yol kısa deneme kesimi (ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu kesimlerde, uzun çıkışı olan ve eğimi artan rampa kesimlerinde, kavşak noktalarında vb.) uzun yıllar davranışının diğer fiberli TMA karışımlara göre kıyaslanarak görülmesidir. Maliyet kıyaslaması yapıldığında deneysel çalışmalarda sonuç değerler olarak diyatomit yüzdesi agrega karışımının %3'ü oranında fiber yüzdesi ise %0,45 oranında kullanılmıştır. Dolayısıyla 1000 kg =1 ton miktarındaki agrega karışımında; diyatomit kullanıldığı zaman 30 kg diyatomit, fiber kullanıldığında ise 4,5 kg fiber kullanılmaktadır. Örneğin, 1 km yol için kullanılan diyatomit ve fiber için hesap yapılırsa: %3 diyatomit tutarı $1183,2(t) \times 0,88 (TL) / 1,065(t) = 977 TL$ 'dir. % 0,45 fiber tutarı $1183,2(t) \times 10,26(TL) / 1066(t) = 11 378 TL$ 'dir. Buradaki hesaplardan her 1 km TMA karışımı için $11 378 - 977 = 10 401 TL$ fazla tutar harcandığı 100 km'lik bir yol yapımı için hesabı genişletirsek yaklaşık olarak 1 040 100 TL fazla tutar harcandığı ortaya çıkmaktadır. Diyatomit kullanımının büyük ekonomik katkılar sağlayacağını ve maliyet-etkin projeler üretilmesi açısından uygun olduğu belirtilmiştir.

Song vd. (2011), diyatomit ve bitüm gruplarının etkileşim kuralı üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmada, bitüm A ve bitüm B olarak iki farklı bitüm kullanılmıştır. Öncelikle diyatomit 170 °C'de 60 dk kurutulduktan sonra 150 °C'de ısıtılan bitüme ilave edilmiştir. Diyatomitin bitümle kütle oranı 1: 10'da sabitlenmiştir. Son

olarak karışım, yüksek kesmeli bir YKA-100LT kullanılarak 3600 devir/dk hızında 150 °C'de 20 dk süreyle karıştırılmıştır. Sonuçlar, çubuk şeklindeki diyatomit bitümlü harcın yüksek sıcaklık performansının, küresel diyatomitinkinden daha iyi olduğunu göstermiştir. Diyatomit, gelişmiş gözenek yapısı nedeniyle bitümdeki daha küçük molekülleri etkili bir şekilde adsorbe etmiştir. Gözenek boyutu, 3,5 ila 3,9 nm arasında değişen adsorpsiyonda etkili bir rol oynamıştır. Dolayısıyla araştırma sonucunda diyatomit ile reçineler ve bitüm arasında yalnızca zayıf fiziksel adsorpsiyon olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde bitüm a'daki doygun içeriğinin, bitüm b'nin dört katı olduğu ve aromatik içeriğin bitüm b'de yaklaşık %60 oranında olduğu sonucuna varılmıştır. Diyatomitle modifiye edilmiş bitümün yüksek sıcaklık performansı ve nem hasarına dayanıklılığı önemli ölçüde iyileşmiş, ancak düşük sıcaklık performansında bu sağlanamamıştır.

Cong vd. (2012), diyatomitin bitüm bağlayıcı özellikleri üzerine olan etkilerini ve diyatomitin, modifiye bitümün fiziksel özellikleri ve dinamik reolojik davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aratırmacılar, çalışmalarında AH-70 asfalt sınıfı, 70/73 penetrasyon sınıfı bitüm (25 °C'de 0,1 mm, 100 g ve 5 s), yumuşama noktası 45,6 °C, en az 150 cm (15 °C'de) süneklik ve kütle yoğunluğu 0.29 gcm⁻³, maksimum parça boyutu 19µm ile viskozitesi 0.44 pa s (135 °C'de) olan diyatomiti Çin'in Liaoning Eyaleti'den elde etmişlerdir. B70/73 sınıfı bitüme ağırlıkça (%5, %10, %15, ve %20) farklı oranda diyatomit kullanarak 3000 rpm devirde 30 dk 150 °C'de karıştırılarak modifiye bitümlü bağlayıcı hazırlanmıştır. Bu bağlayıcılar üzerinde standart (penetrasyon, FTIR, dönel viskozite, DSR, kompleks modül, yumuşama noktası, yaşlanma indeksi) deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları, bitümlü bağlayıcı ile diyatomit arasında kimyasal bir reaksiyonun olmadığını göstermiştir. Depolama stabilitesi testleri, diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm, diyatomit içeriği %20'den az olduğunda çok kararlı olduğunu göstermiştir ancak modifiye edilmiş bitümlerin depolanma kararlılığı, diyatomit içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Diyatomit içeriğinin artırılmasıyla, yüksek sıcaklıklarda hem viskozite hem de kompleks modül hızlı bir şekilde artmıştır. Dönel viskozite sonuçları, diyatomitin yüksek sıcaklık performansını iyileştirebileceğini göstermiştir. Diyatomit içeriği %20'den düşük olduğunda viskozite hızla artar. Ancak diatomit içeriği % 20'nin üzerinde olduğunda viskozite artış eğilimi

azalır (Orijinal bitümlü bağlayıcının viskozitesi 0,44 Pa s'dir. % 15 diyatomit içeren modifiye bitümlü bağlayıcı için ise 1,24 Pa s'dir.



Şekil 2.5 Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin 135 °C’da viskoziteleri ve depolama stabilitesine etkisi (Cong vd .2012).

Kısa süreli yaşlandırmadan sonra farklı diyatomit içeriğine sahip modifiye bitümlü bağlayıcıların ilgili özelliklerindeki değişiklikleri Çizelg 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 RTFOT deney sonuçları (Cong vd .2012).

Kısa süreli yaşlanmanın diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların ilgili özelliklerine etkisi.			
Diyatomit içeriği (%)	Kütle kaybı (%)	Yumuşamanoktası artışı (°C)	Yaşlanma indeksi AI
0	0,138	4,7	0,0185
5	0,117	4,6	0,0179
10	0,108	4,4	0,0116
15	0,096	4,1	0,0097

Sonuçlar, modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının kütle kaybı, yumuşama noktası artışı (DT) ve yaşlanma indeksinin (AI) azaldığını ve yaşlanma sonrasında diyatomit içeriğinin artmasıyla birlikte tutulan penetrasyon yüzdesinin (PRP) arttığını göstermektedir.

Yi-qiu vd. (2012), diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlarının düşük sıcaklık özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, A80/100 penetrasyon bitümü kullanılmıştır. İki

farklı Changbai (CD) ve Linjiang (LD) diatomiti Çin'in Jilin eyaletinden elde edilmiştir. Optimum CD ve LD içeriğini belirlemek için merkezi bileşik tasarım yöntemi kullanılmıştır. Her ikisinin de optimum içeriği ağırlıkça %14 belirlenmiştir. Kontrol, CDMB'ler-80 ve LDMB'ler-80 karışımları için optimum bağlayıcı içeriği (OBC) sırasıyla % 5.0, %5.2 ve %5.3 olarak seçilmiştir. Bu nedenle, tüm karışımların %4 hava boşluklarında üretildiği belirtilmiştir. Baz bağlayıcının modifikasyonu için, CD ve LD'nin %14'ü sırasıyla 160 °C'de 5000 rpm hızında 40 dakikalık bir süre için dönen yüksek hızlı bir karıştırıcı kullanılarak homojen bir modifiye karışım elde edilmiştir. Diatomit ile modifiye edilmiş bitüm karışımlarının laboratuvar deney sonuçları, deneme yolunun gözlemlenen sonuçları ile tutarsızdır. Bunun nedenini bulmak için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC), Kızılötesi Spektroskopi (IR), Dinamik Mekanik Analiz (DMA), ışın bükme deneyi, tek eksenli sıkıştırma ve termal iletkenlik (TC) deneyleri kullanılmıştır. Sonuçlar, diatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımın, kontrol karışımından daha iyi düşük sıcaklık performansına sahip olduğunu ve ısıl iletkenlik deneyinden, diatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlarının ısı kapasitesi değerlerinin, kontrol karışımlarının 1,3 katı olduğu bulunmuştur. Diatomit ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının ısıl yayılma ve ısıl iletkenlik değerleri ise kontrol karışımlarına göre daha düşüktür. Bu, bitüme diatomit ilave edildikten sonra bitümlü karışımının termal fiziksel özelliklerinin değiştiğini göstermiştir. Yapılan dinamik mekanik analiz indeksleri (TSRST), mekanik deney sonuçlarından, diatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlarının, saf bitümlü karışımlardan yüksek ve düşük sıcaklıklarda daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 2.3 Saf bitüm ve diatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların deney sonucu (Yiqui vd.2012).

Özellik	Bitüm	CDMBs-80	LDMBs-80
Penetrasyon 25 °C 100 g, 5 s (0,1 mm)	85	68	60
Penetrasyon indeksi PI	-1,72	-1,24	-0,8
T ₈₀₀ (°C)	43,7	47,8	50
T _{1,2} (°C)	-10,1	-10,4	-12,5
Yumuşama noktası (°C)	45,8	52	52
Kütle kaybı (%)	1,1	1,21	1,1
Penetrasyon 25 °C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	49,7	42,5	37,3
Penetrasyon oranı (%)	58,5	62,5	62,2
Yumuşama noktası (°C)	53,9	55,1	59,4

Zhang vd. (2012), çalışmalarında diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm karışımı için düşük sıcaklık performans değerlendirmesi yapmışlardır. Karışımdaki diyatomit dozajının gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farklarından oluşan düşük sıcaklık bozulmalarının kaplama üzerindeki etkisini belirlemek için konvansiyonel indeks ve düşük sıcaklıkta eğilme sünme deneyleri yapılmış ve doğrulama için de karışıma düşük sıcaklık eğilme deneyi uygulanmıştır. Çalışmada, optimum diyatomit değeri olarak %13 diyatomit dozajı kullanılmıştır. Diyatomit etüvde 105 °C altında sabit ağırlığa glene kadar kurutulmuştur. Daha sonra 150 °C sabit sıcaklıkta 30 dk bekletilmiştir. Bitüm, akışkan durumuna gelene kadar yavaşça 150 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Diyatomit, orantıya göre tam olarak tartılmış, ardından bitüme ilave edilmiş ve kabarcık çıkmayana kadar 10 dk boyunca karıştırılmıştır. Parçacıkların uçmasına veya kümelenmesi önlenmiştir. Yapılan deneyler Karayolu Mühendisliği için mevcut standart bitüm ve bitümlü karışım yöntemlerine (JTJ052-2000) göre sırasıyla test edilmiştir.

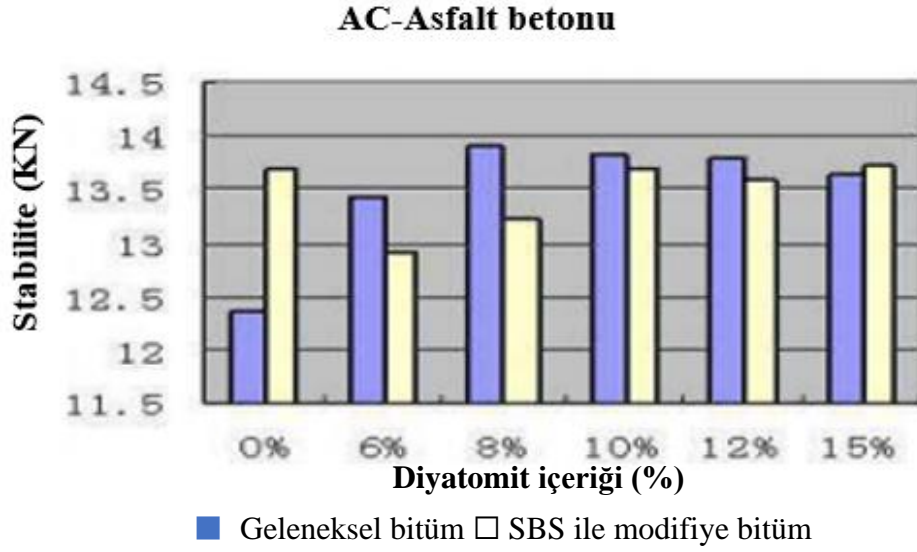
Çizelge 2.4 Konvansiyonel deney sonuçları diyatomit modifiye asfalt üzerindeki göstergeler (Zhang vd. 2012).

Diyatomit dozajı (%)	5 °C süneklik (cm)	Penetrasyon (0,1mm)			T _{1,2} (°C)
		5 °C	15 °C	25 °C	
0	27,73	13,8	37,4	100,8	-19,6
9	11,00	15,0	27,8	77,0	-25,1
11	11,77	14,2	31,4	68,2	-26,5
13	8,53	13,6	25,8	60,4	-27,1
15	9,33	13,2	29,8	60,0	-26,9
17	8,13	12,7	26,9	62,0	-24,6

Deney sonuçları, diyatomitin bitüme eklenmesinden sonra eşdeğer kırılma noktasının önemli ölçüde azaldığını, süneklik testinin düşük sıcaklık performansını çok iyi tahmin edemediğini, sertlik modülünün arttığını ve esneklik kabiliyetini azalttığını; düşük sıcaklıkta çatlama direnci arttığını göstermiştir. Bu nedenle, diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm üzerinde BBR'nin düşük sıcaklık performans değerlendirmesi yoluyla bitüm karışımının düşük sıcaklık performans değerlendirme yöntemi tartışılmaya devam etmektedir. Sonuçlar, diyatomit modifikatörünün bitümün düşük sıcaklık davranışını önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir, ancak yine de optimal bir dozaj mevcuttur. Diyatomitin eklenmesi, bitümün sertleşmesine yol açar, sonuç olarak süneklik azalır ve süneklik, diyatomit modifiye bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık performansını değerlendirmek için çok uygun değildir. Diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm eşdeğer

kırılma noktası $T_{1,2}$, matris asfalttan açıkça daha düşüktür ve $T_{1,2}$, % 13'lük dozajda matris asfaltın 8°C altında minimuma ulaşır, bu, diatomitin düşük sıcaklık performansını büyük ölçüde iyileştirdiğini gösterir. Düşük sıcaklıkta kırılma eğilme deneyine göre, diatomit dozajı %13 ~ 14 olduğunda, eğilme direnci modülü ve eğilme gerinim enerjisi optimum seviyelerine ulaşır. Optimum diatomit dozajı, eşdeğer kırılma noktası ile (%13) birleşerek doğrulanmıştır.

Jiang ve Liu (2013), diatomit modifiye edilmiş bitümlerle ilgili araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, bitüm karışımının yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık veya suda bekletme stabilitesini artıran saflaştırılmış diatomit mekanizmalarını araştırılmasını, aynı zamanda, yeni bir modifikatör olarak saflaştırılmış diatomitin yaygın kullanımı için teorik ve ekonomik referanslar sağlayarak proje uygulamasının ekonomisi üzerine analizler yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinde bitüm AC-13C tipi (bazalt) ve AC-20C tipi (kireçtaşı) asfalt betonu, Dali, Yunnan, Chongqing marka RR-300 tipi, bitüm 70 ve yol asfaltında kullanılan diatomitler kullanılmıştır. Yapılan deneyler ile birbirinden farklı olan asfalt betonuna optimal diatomit dozajının uygulandığı gösterilmiştir. Örneğin AC-13C asfalt betonu %15 diatomit ile, AC-20C asfalt betonu %8 diatomit ile karıştırılmalıdır. Geleneksel asfalt betonu ve diatomit katkılı altı farklı asfalt betonu üretilmiştir. Daha sonra asfalt karışımı çeşitli yüksek sıcaklıklarda stabilite, düşük sıcaklıkta çatlama direnci, yorulma direnci ve suda bekletmeli stabiliteyi karşılaştırılmıştır. Şekil 2.6'de çalışmanın Marshall stabilite deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 2.6 Marshall stabilite değerleri (Ling vd.2014).

Yapılan deneyler sonucunda, diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların Marshall stabilitesi, eğilme kırılma mukavemeti, dinamik stabilite, kalıcı deformasyon, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlağı performanslarının iyileştiğini görülmüştür. Diyatomit iyi uyumluluk, karıştırma sıcaklığı, üniform bir karışım oluşturmak için bitüme üniform olarak dağıtılabılır ve iyi bir stabiliteye sahiptir. Maliyeti bitüm karışımı başına sadece 0,69-0,84 TL olup, bunun %50'si uzun mesafeli nakliye ve diğer giderler içindir.

Cheng vd. (2015), diyatomit ve mineral tozun bitümün termal oksidatif yaşlanma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bitümün yaşlanması asfalt kaplamaların performansını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, karışımın yaşlanma özelliğini iyileştirmek için diyatomit ve mineral tozun bitümün yaşlanma özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmada, kullanılan bitüm AH-90, Çin'in Liaoning Eyaletinden temin edilmiştir. Diyatomit asfalt mastiği (DA) ve mineral tozu asfalt mastiklerinin (MA) hazırlanması laboratuvarında yapılmıştır. Cong vd. ve Guo vd.'nin araştırmalarına göre bu çalışmada, asfalt ağırlığına göre %5, %10 ve %15 dört içerik seçilmiştir. Öncelikle diyatomit ve bitüm ayrı ayrı 150 °C'de dört saat boyunca fırına yerleştirilerek bitümün yeterince akması ve diyatomitin karışım sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Daha sonra diyatomit ve bitüm 4000 dev/dk hızla yüksek parçalayıcı homojenizatör ile karıştırılarak diyatomitin bitüme homojen dağılmasını

sağlamak için 150 °C'de 40 dk'da karıştırılmıştır. Laboratuarda kısa süreli yaşlanma yapmak için ince film halinde ısıtma testi (TFOT) kullanılmıştır. Yaşlandırma işlemi 5 sa 163 °C'de gerçekleştirilmiştir. Her iki mastiğin penetrasyon, yumuşama noktası, kuvvet sünekliği, düşük sıcaklıkta sünme ve viskozite gibi özellikleri TFOT öncesi ve sonrası test edilmiştir. Sonuçlar, filler maddelerinin arttırılmasıyla korunan penetrasyon yüzdesinin (PRP) arttığını gösterilmiştir. Modifiye bitüm mastiklerin yumuşama noktası (ΔT), düktilite tutma oranı (DRR), deformasyon enerji yaşlanma indeksi (JAI) ve viskozite yaşlanma indeksi (VAI) artışı, dolgu maddelerinin arttırılmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmıştır. Bitümün yaşlanması diyatomit ve mineral tozu ile azalmıştır. Diyatomitin yaşlanma önleyici etkisinin ise, gözenekli yapısı nedeniyle mineral tozundan daha iyi olduğuna kanat getirilmiştir. Aynı zamanda optimum diyatomit içeriği %12,8 olarak önerilmiştir.

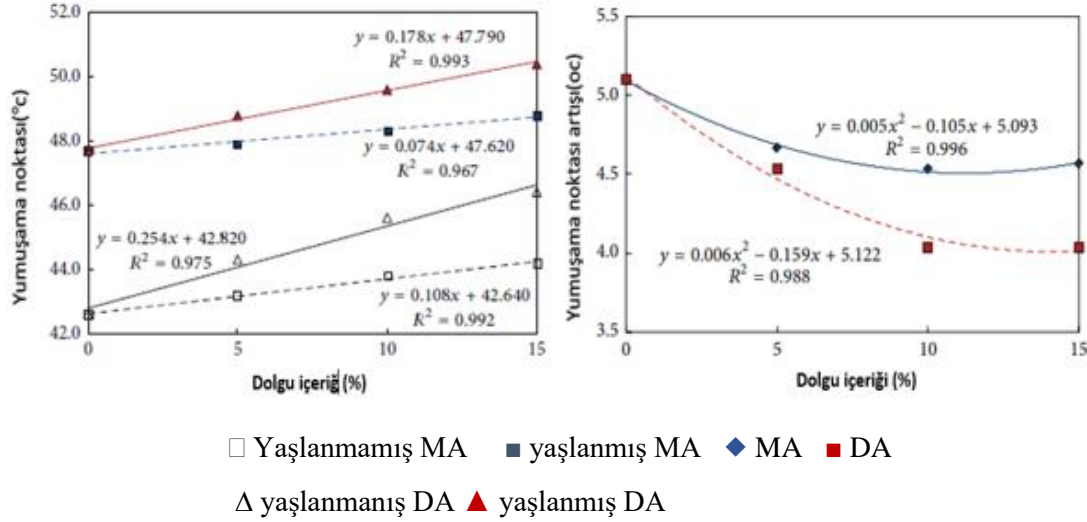
Çizelge 2.5 Gelenkesel bitüm fiziksel özellikleri.

Özellikler	Değer
penetrasyon(25°C, 0,1mm)	90
yumuşama noktası (°C)	42,6
yoğunluk (15°C, g/cm ³)	1,014
TFOT SONRASI	
kütle kaybı (%)	0,37
penetrasyon oranı (%)	59

Diyatomitin bitüm üzerinde yaşlanma önleyici etkisi mineral tozuna göre daha etkilidir. Yaşlanmanın bitümün ısıl duyarlılığı üzerindeki etkisi diyatomit ve mineral tozu ile zayıflatılabilir. Diyatomit ve mineral tozu, bitümün iç bileşenlerinin birbirine bağlanmasını önler. Diyatomit yumuşama noktası üzerindeki etkisi mineral tozuna göre daha önemlidir. Bunun, nedeni mineral tozu ve diyatomit arasındaki iç yapı ve gradasyon farkına bağlanabilir. Bu yüzden DA yüksek sıcaklıkta daha iyi sıcaklık kararlılığı göstermiştir. Bu da DA'nın daha yüksek bir yumuşama noktasıyla sonuçlanmasına sebep olmuştur.

Şekil 2.7'da gösterildiği gibi, dolgu maddelerinin artmasıyla yumuşama noktası artışı azalmaktadır. Ve DA'nın yumuşama noktası (ΔT) artışları, MA'nınkinden daha azdır. Bu

nedenle, bitümün termal oksidatif reaksiyonu, diyatomit ve mineral tozu ilavesiyle azaltılır.



Şekil 2.7 TFOT öncesi ve sonrası içeriğe karşı asfalt (Chneg vd. 2015).

Sonuç olarak, diyatomit kullanımı, gözenekli yapısının bir sonucu olarak bitümün yaşlanma önleyici özelliğini iyileştirmeye yardımcı olmuştur. Bu, bitümlü kaplamanın termal stabilitesini artırılmıştır. Asfalt karışım tasarımında ise %12,8 oranında birleşik içerik kullanılması önerilmektedir.

Guo vd. (2015), diyatomit ve cam elyaf bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt karışımların performansı üzerine laboratuvar değerlendirmesi yapmışlardır. Yapılan araştırmanın amacı, diyatomit ve cam elyafın bitümlü karışımı üzerindeki birleşik etkilerini araştırmaktır. Diyatomit ve cam elyaf bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt karışımı (DGFMM) laboratuvarında hazırlanmıştır. DGFMM performansları deneysel yöntemle araştırılmıştır. Tekerlek izi deformasyonu deneyi, düşük sıcaklıkta indirekt çekme, indirekt çekme yorulma (ITFT) ve indirekt çekme sertlik modülü deneyleri (ITSM) yapılmıştır. Bu çalışmada, deneyler için ağır trafik bitümü AH-90 kullanılmıştır. Öncelik le diyatomit ve kontrol bitümü istenilen kalitede tartılarak 135 °C'de 4 sa etüde bekletilmiştir. İkinci olarak, diyatomit ve kontrol bitümü etüvden çıkarılmış ve kontrol bitümüne diyatomit eklenmiştir. Diyatomit ve bitüm, karıştırma ekipmanı ile 600 dev/dk hızla karıştırılmıştır. Tekrarlanan deney sonuçlarına göre, karıştırma süresinin 15 dk'ya ayarlanması gerektiği bulunmuştur. Ayrıca modifiye bitüm uzun süre yerleştirildiğinde

diyatomit partikülleri partikül ağırlığının bir sonucu olarak bitüme batacaktır. Karışımın üzerinde uygun maliyetli modifikasyon bakış açısından, deneyler için üç içerik (%0.1, %0.2 ve %0.3) diyatomit ve cam elyafı seçilmiştir. Örnekler laboratuvarında yapılmıştır. Diyatomitin asfalt karışımının düşük sıcaklıkta deformasyon özelliği üzerindeki dezavantajı cam elyafı ile çözülmüştür. DGMAM, kontrol karışımından daha iyi performans göstermiştir. Diyatomit ve cam elyaf, asfalt karışımının tekerlek izi deformasyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir. Diyatomitin tekerlek izi deformasyon direnci özelliği üzerindeki etkisi, cam elyafından daha önemlidir. Diyatomitin asfalt karışımının üzerindeki olan düşük sıcaklık özelliğinin dezavantajı cam elyafı ile aşılmıştır. Diyatomit ve cam elyaf, asfalt karışımının yorulma özelliğini iyileştirir, DGMAM, kontrol karışımından daha iyi bir yorulma performansına sahiptir. DGMAM ile inşa edilen kaplama, kontrol karışımına göre daha uzun hizmet ömrüne sahip olacaktır. DGMAM'ın rijitlik modülü, kontrol karışımınınkinden daha büyüktür ve -10 °C'nin altındaki sıcaklıkta kontrol karışımının modülünden daha azdır. Sonuçlar, diyatomit ve cam elyafının, kontrol asfalt karışımının tekerlek izi deformasyon direncini ve yorulma özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Özetle, DGMAM ile yapılan kaplama, kontrol karışımı ile yapılan kaplamadan daha iyi performansa sahip olacaktır.

Wei vd. (2016), kırıntı kauçuğu ve diyatomit bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt karışımı için buzlanmayı önleme performansının değerlendirilmesini incelemişlerdir. Diyatomit, düşük maliyetli ve önemli depolama stabilitesi, yüksek emme kapasitesi ve stabilizeye sahip, yaygın olarak kullanılan bir mineraldir. Çalışmada bitümün performansını iyileştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, kırıntı kauçuğu ve diyatomit bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt karışımının buzlanmayı önleme performansı değerlendirilmiştir. İlk olarak, bileşik modifiye karışımları laboratuvarında hazırlanmıştır. İlgili hacimsel parametreler ve mekanik özellikler karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. İkinci olarak, buzlanmayı önleyici deney numuneleri üretilmiş ve tasarlanmış aparatlarla ölçülmüştür. Son olarak, bu faktörlerin modifiye edilmiş karışımın buzlanma önleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, kırıntı kauçuğu ve diyatomit bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt karışımı kullanılarak buzlanmayı önleyici kaplama tasarımı için bir referans sağlayabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, bağlayıcı olarak AH-90, katkı maddesi olarak kullanılan ağırlıkça %15 diyatomit içeriği deney yoluyla bulunmuştur.

Agreganın ağırlıkça %3'lük parça kauçuk içeriği ise hacimsel parametreler ve karışımların Marshall kararlılığı ile belirlenmiştir. Karışım hazırlarken, öncelikle kırıntı kauçuğun agregada içinde karıştırma kabında 90 sn karıştırılmıştır. Bunun nedeni, parça kauçuğun yoğunluğunun agregadan daha düşük olmasıdır. Daha sonra 90 sn agregaya ve kırıntı kauçuğuna bitüm ilave edilerek kırıntı kauçuk modifiye bitüm karışımı elde edilir. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, kırıntı kauçuğu ile modifiye edilmiş bitüm kullanılan kaplama, geleneksel olandan daha iyi buzlanmayı önleme performansına sahiptir. Yüksek sıcaklıkta modifikasyondan sonra hem viskozite hem de kompleks modül değerleri artmıştır. Bununla birlikte, kompleks modülü 5 °C'nin altına düşmüş ve bu da modifiye bitüm karışımının düşük sıcaklıkta çatlamasına neden olacaktır. Sonuç olarak, kontrol bitüm karışımının mekanik özellikleri kırıntı kauçuğu ve diyatomit ile geliştirilebileceği bulunmuştur.

Lou vd. (2016), diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımının kaplama performansı üzerine çalışma yapmışlardır. Artan trafik, ağır trafik yükü ve diğer kaplama sorunları sürekli ortaya çıkmakta bu sorunları çözmek için yol kaplamalarının iyileştirilmesi gerekmektedir. Malzemelerinin kullanımı yoğun trafiğin gereksinimlerini karşılarsa da kendi kusurlarından dolayı kaplama yapısının zarar görmesi muhtemeldir. Bu nedenle, asfalt karışımların kaplama performansını iyileştirmek için bitümün modifiye edilmesi gerekir. Kaplama performansını iyileştirmek için, diyatomit ile 70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Diyatomit ile modifiye edilmiş asfaltı yapmak için AC20 gradasyonu ve %4,2 asfalt-agrega oranını seçilmiştir. Bu çalışmada, ortaya çıkan sorunları gidermek ve kaplamanın performansını iyileştirmek amacıyla katkı maddesi olarak diyatomit kullanılmıştır. Çünkü diyatomit, stabil kimyasal özellik, termal stabilite ve güçlü absorpsiyon kabiliyeti gibi mükemmel özelliklere sahip, bitüm ve bitümlü karışımlarının performansını artırmak için kullanılacak bir modifikatör olup, modifikasyon maliyeti düşüktür, modifiye yöntem ve yapım süreci ise oldukça basittir. Karışım için bitümü akışkan hale gelene dek ısıtılmış uygun sıcaklıkta diyatomit eklenmiş ve yarım saat karıştırma yapılmıştır. Modifikasyon işlemi tamamlandıktan sonra deneme numuneleri, diyatomit içeriğine göre %9, %11, %13, %15'e bölünmüştür. Bu numunelerin üzerine Marshall ve tekerelek izi deformasyon deneyleri uygulanmıştır. Diyatomit içeriği arttıkça, Marshall stabilitesi de artmıştır. Dolayısıyla %13 diyatomit içeriğinde en iyi

mukavemet değeri elde edilmiştir. Deney sonuçları, asfalt karışım mukavemetinin, Marshall stabilitesinin ve yüksek sıcaklık stabilitesinin donma çözülme indirekt çekme mukavemeti modifikasyondan sonra büyük ölçüde iyileştirildiğini ve içerik %13 olduğunda kaplama performansının nispeten daha iyi olduğunu göstermiştir.

Wei vd. (2017), diyatomit ve SBS'nin kırıntı kauçuk modifiye bitümlü karışımların donma-çözülme direncine olan etkilerini araştırmışlardır. Atık malzemelerin yeniden kullanılması, doğal kaynakların ve çevrenin korunmasına yardımcı olur. Çalışmada, CR ve diatomit, SMA'yı modifiye etmek için geri dönüştürülmüştür. CR, diyatomit ve SBS, CRSMA, CRDSMA ve CRSSMA'yı hazırlamak için kullanılmış, laboratuvarında sırasıyla hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerindeki F-T etkileri araştırılmıştır. Bitümlü karışımlar, donma-çözülme (F-T) döngülerinin etkisi altında nem hasarına karşı hassastır. Kullanılan deneylerde bağlayıcı olarak AH-90 bitümü, Çin'in Liaoning eyaleti, panjin petrokimya endüstrisinden temin edilmiştir. Önceki araştırma sonuçlarına göre, diyatomit içeriği ağırlıkça %15 bitüm ve kırıntı kauçuk içeriği agregaya göre ağırlıkça %3 olara belirlenmiştir. Optimum bitüm içerikleri Marshall yöntemi ile belirlenmiş, CRSMA, CRDSMA ve CRSSMA için sırasıyla% 6,3, % 6,5 ve% 6,6 belirlenmiştir. F-T döngülerinin süreci tasarlanmış, CRSMA, CRDSMA ve CRSSMA'nın donma önleyici performanslarını değerlendirmek için hava boşluğu, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve dolaylı gerilme sertliği modülü (ITSM) ölçülmüştür. Sonuçlar, F-T döngülerinin artmasıyla hava boşluklarının arttığını göstermiştir. ITS ve ITSM, F-T döngülerinin artmasıyla azalmış, diyatomit ve SBS ilavesi, hava boşluğunu azaltabileceğini ve CRSMA'nın ITS ve ITSM'sini iyileştirebilirliğini göstermiştir. CRSSMA, en düşük hava boşluğu, en yüksek çekme mukavemeti ve en büyük sertlik modülünü sunar bu da CRSSMA'nın üç farklı karışım türü arasında en iyi F-T direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Davar vd. (2017), bazalt liflerinin ve diyatomit toz bileşiğinin, düşük sıcaklıklarda sıcak karışım bitümün artırılmış yorulma ömrü ve gerilme mukavemeti üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada, diyatomit ve bazalt elyafın bitümlü karışımının performansına olan etkisi değerlendirilmiştir. Bağlayıcı olarak diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan diyatomit tozu ve bitümlü bağlayıcı

PG64-22 performans sınıfına sahip olup Pasargad Rafinerisi'nden (İran) temin edilmiştir. Kontrol bitümlü karışım numunesine (katkı maddesi içermeyen) (CAM) bitümlü bağlayıcının ağırlıkça %15'i diyatomit ve karışımın ağırlıkça %0.3'ü bazalt elyaf ile birlikte modifiye asfalt karışımı (BFDMM) hazırlanmıştır. Zhao vd.'nin (2017), çalışması esas alınarak optimal değerlere göre örnek sayısı, lif ve diyatomit miktarları belirlenmiştir. Cong vd. (2012), katkı maliyetlerinin asfalt karışımlarının nihai birim fiyatı üzerindeki etkisi, karışım verimliliği ve deneysel maliyetler gibi faktörler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Tüm numuneler için optimum bitümlü bağlayıcı içeriği %5,8 olarak malzemelerden daha önce benimsenen bir karıştırma dizaynına göre ayarlanmıştır. Diyatomit tozu ile modifiye edilmiş numuneler hazırlamak için ıslak karıştırma (bitüm bağlayıcının bir karıştırıcıda toz ile karıştırılması) ve diyatomiti bitümle karıştırmak için minimum 600 rpm oranında bir karıştırıcı kullanılmıştır. Bu amaçla önce bitüm bağlayıcı ve diyatomit ayrı ayrı 135 °C'de 4 sa ısıtıldıktan sonra mikserde 15 dk karıştırılmıştır. Yürütülen deneyler, karışımın yorulma ömrünü belirlemek için 20 °C'de dört noktalı bir bükme kiriş testi ve karışımın gerilme mukavemetini ve nihai gerilmesini belirlemek için -5 °C'de dolaylı gerilme mukavemeti deneyini içermektedir. Sonuçlar, genel olarak, daha yüksek gerilme seviyelerinde, elyafların bitümlü karışımlarının yorulma ömrünü uzatmayabileceğini göstermektedir. Yorulma ömrünü uzatmada tek başına bazalt kompozitinin etkili olmamasına rağmen, liflerle güçlendirilmiş karışımlarda (daha yüksek sertliğe sahip olan) diyatomit kullanımının yorulma ömrünü iki katına çıkardığını göstermiştir. -5 °C'de dolaylı çekme deneylerinin sonuçları incelendiğinde ve başarısızlıktaki gerilme aralığına bakıldığında, bazalt liflerinin düşük sıcaklıklarda sıcak karışım asfaltın özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebildiği, diyatomit ve bazalt liflerinin aynı anda kullanılmasının düşük sıcaklıklarda asfalt karışımlarının zayıflıklarını iyi bir şekilde telafi edebildiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Cheng vd. (2017), diyatomit ve bazalt elyaf bileşiği modifiye asfalt mastiklerinin özellikleri üzerine laboratuvar çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, kullanılan bağlayıcı AH-90, Çin'in Liaoning eyaletinde bulunan Panjin Petrokimya Fabrikası tarafından temin edilmiştir. Diyatomitin fiziksel özellikler ve parçacık boyutu dağılımı Çizelge 2.6'de verilmiştir.

Çizelge 2.6 Diyatomit özellikleri.

Özellik	Renk	pH	Spesifik yer çekimi(gr/cm ³)	Kütle yoğunluğu (gr/cm ³)
Değer	Kırık Beyaz	8	22,0-2,2	0,34-0,41

Araştırmacılar onüç farklı diyatomit ve bazalt elyaf bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt mastik (DBFCMAM) grubu numuneleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada diyatomit veya lifle modifiye edilmiş asfalt mastiklerinin hazırlanması için referans yöntemine göre, optimum diyatomit içeriği yaklaşık %15 ve bazalt lifinin içeriği yaklaşık % 3'tür. Bu nedenle, diyatomit ve bazalt elyaf içeriklerinin, % 5, % 10 ve % 15 diyatomit içeriğinin ve bazalt elyaf içeriği % 1, % 2, % 3 ve % 4 benimsenmiş, diyatomit ve bazalt elyafın kapsamlı yol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 13 farklı bileşik modifiye asfalt mastik grubu üretilmiştir (Çizelge 2.7).

Çizelge 2.7 Diyatomit ve bazalt lif içeriği.

Deneysel numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Diyatomit içeriği (%)	0	5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	10
Bazalt Lifi içeriği (%)	0	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

DBFCMAM'ın hazırlanma prosedürü şu şekildedir: Öncelikle saf bitüm, diyatomit ve bazalt elyafı ayrı ayrı 150 °C'de 4 saat etüve yerleştirilerek bitüm yeterli akışkanlığa getirilmiş ve diyatomit ve bazalt elyafın karışım sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Daha sonra karıştırma sıcaklığı 150 °C, kesme hızı oranı 5000 dev/dk ve karıştırma süresi 50 dk.'dır, böylece diyatomit ve bazalt elyafı asfalt mastiği içerisinde homojen olarak dağıtılmıştır. Elde edilen karışım üzerinde, DBFCMAM'ın yüksek sıcaklık performans değerlendirmesi için yumuşama noktası, koni penetrasyonu, viskozite ve DSR deneyleri yapılırken, DBFCMAM'ın düşük sıcaklık performans çalışmasında kuvvet ölçerli düktilite deneyleri kullanılmıştır. Diyatomit ve bazalt elyaf bileşiği ile modifiye edilmiş asfalt mastiklerinin özellikleri incelenmiş; laboratuvar deneyleri yoluyla şu sonuçlara ulaşılmıştır: Koni penetrasyon, yumuşama noktası, ve viskozite deneyine göre, koni derinliği azalırken, asfalt mastiğine diyatomit ve bazalt elyaf eklendiğinde kesme gerilmesi, yumuşama noktası ve viskozite artmıştır. Bu nedenle diyatomit ve bazalt elyaf

bileşigi bitüm (DBFCMAM), saf bitümle kıyasla yüksek sıcaklıkta tekerlek izine karşı daha iyi bir dirence sahiptir; asfalt mastiğinin yüksek sıcaklık stabilitesi diyatomit ve bazalt elyaf ile geliştirilmiştir. DSR deneyi ise, diyatomitin ardından bazalt elyaf ilavesi, kompleks modülü (G^*) ve tekerlek izi faktörü ($G^*/\sin\delta$) artmış ve faz açısı (δ) ise azalmıştır. Diyatomit ve bazalt elyafının eklenmesi, asfalt mastiğinin sertliğini ve esnekliğini önemli ölçüde iyileştirmiş; bu nedenle DBFCMAM'ın yüksek sıcaklık performansı, saf bitüme kıyasla keskin bir artış göstermiştir. Özet olarak, DBFCMAM'ın yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirmiştir.

İbrahim vd. (2021), modifiye katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışıma etkisi ve performans üstünlüklerini incelemiştir. Günümüzde esnek üstyapı kaplamalarında kullanılmak üzere değişik modifiye edici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) modifiye edilmeleriyle yol kaplamalarının oluklanma, sökülme, ondülasyon düşük sıcaklık çatlakları vb. olumsuzluklara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Çalışmada, dünyada en çok kullanılan plastomer elastomer, doğal hidrokarbonlar, göl asfaltı ve selülozik elyaf esaslı katkı maddelerinin BSK performansı üzerindeki etkileri ve birbirlerine karşı üstünlükleri incelenmiştir. Çalışmada, katkılı ve geleneksel karışımların stabilite, yorulma ve tekerlek izi oluşumu performansını belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında Marshal tasarımı, statik sünme, tekrarlı sünme, dolaylı çekme deneyi ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Tekerlek izi oluşumunda bütün modifiye katkılı karışımların geleneksel karışımlara göre üstün performans sağladığı görülmektedir. Özetle, katkı maddelerinin BSK üzerinde gösterdikleri performans, BSK'nın maruz kaldığı yükler, çevre ve diğer olumsuz etkiler karşısında farklılık arz etmekle birlikte, her bir katkı maddesinin birden fazla olumlu etkisi görülmüştür.

Yang vd. (2018), diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımının performans değerlendirilmesi ve iyileşme mekanizmalarını araştırmışlardır. Araştırmada, 60-80 penetrasyonlu temel bitüm Çin, Ezhou'dan temin edilmiştir. Dört karışım EZ-SBS, IM-SBS ile modifiye edilmiş, diyatomit ile modifiye edilmiş ve baz bitümlü karışımlar hazırlanmıştır. Literatür taramasına göre, numunelerin hazırlanması için %12 (ağırlıkça)

diyatomit içeriği ile doğrudan harmanlama yöntemi seçilmiştir. Diyatomit, büyük rezervlerde bulunan organik bir doğal kaynaktır. Bu çalışma, diyatomitin bitüm karışımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada diyatomiti mineralojik özellikler, kimyasal bileşimler, partikül boyut dağılımı, mezogözenek dağılımı, morfoloji ve IR spektrumları açısından karakterize edilmiştir. İkinci aşamada, diyatomit içeren bitüm karışımlarının kalıcı deformasyon, çatlama, yorulma ve nem direncine atıfta bulunan yol performansları incelenmiştir. Diyatomitin karakterizasyonu, yüksek SiO₂ içeriğine ve geniş özgül yüzey alanına sahip olduğunu, gözenekli bir malzeme olduğundan dolayı bitüm emilimine katkıda bulunur ve bu nedenle bitüm ile agrega arasında bağlanmayı geliştirir. Diyatomit ile modifiye edilmiş karışımlarının kalıcı deformasyona ve neme karşı direnci, kontrol karışımlarından daha üstündür. Ancak diyatomit ilavesi, bitümlü karışımının çatlama ve yorulma direncini iyileştirmeye yardımcı olmaz. Yapılan deneylerin sonucunda, diyatomit ilavesi, bitümlü karışımının yüksek sıcaklık performansında da artışa neden olmutur, ancak düşük sıcaklık performansları çok az gelişme ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle pratik mühendislik uygulaması açısından diyatomit ile modifiye bitüm karışımı soğuk bölgelerde asfalt kaplamaların en üst tabakasında kullanım için uygun değildir. Ek olarak, düşük maliyeti ve basit modifikasyon süreci nedeniyle, diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlü karışımının ekonomik faydaları, geleneksel modifiye bitüm karışımına kıyasla büyük avantajlara sahiptir.

Mohd Shukry vd. (2018), diyatomit dolgunun gözenekli asfalt mastiğinin reolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bitümlü bağlayıcıyı sertleştirmek ve karışım mukavemetini artırmak için genellikle bitümlü karışımlara mineral dolgu maddesi eklenir. Yapılan çalışmada, asfalt dolgu mastiği üretmek için %2 içerikli sulu kireç, çimento ve diyatomit seçilmiştir. Asfalt dolgu mastiği için 75 µm elek boyutunu geçen hidratlanmış kireç, çimento ve diyatomit olmak üzere üç tip mineral dolgu seçilerek bağlayıcı ile karıştırılmıştır. Sönmüş kireç ve çimento, PWD şartnamelerinde önerildiği üzere ve uzun süre bitüm karışımında katkı maddesi olarak kullanıldığı için, diyatomit ise gözenekli iç yapısı ve kimyasal bileşimi nedeniyle seçilmiştir. Daha sonra homojen bir mastik elde etmek amacıyla 160 °C' sabit sıcaklıkta asfalt dolgu mastikleri yüksek kesmeli karıştırıcı kullanılarak üretilmiştir.

Karıştırma prosedürleri aşağıdaki şekilde yapılmıştır:

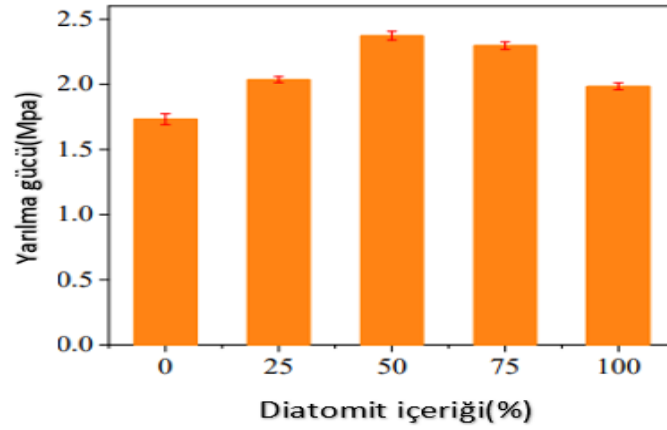
- 1) Önce mineral dolgular elenmiş, kurutulmuş, ve istenilen ağırlığına göre tartılmıştır.
- 2) Ardından PG 76 bağlayıcı eriyene kadar 160 °C'de ısıtılmıştır.
- 3) Yaklaşık 200 g bitüm bağlayıcı bir kaba döküldü ve 160 °C'de tutulan sıcak bir plaka üzerine yerleştirilmiştir.
- 4) Bağlayıcı, 5000 rpm'lik bir hızda 1 dk süreyle mekanik olarak karıştırılmış ve daha sonra karıştırma işlemi sırasında bağlayıcıya uygun dolgu kütlesi yavaşça ilave edilmiştir.
- 5) Homojen mastik elde etmek için karıştırma işlemine 160 °C'lik sabit bir sıcaklıkta 60 dk süreyle devam edildi.



Resim 2.3 Farklı dolgu türleri (a) hidratlanmış kireç, (b) çimento ve (c) diyatomit (shukry vd. 2018).

Çalışmada, farklı tipteki dolgu maddelerinin gözenekli asfalt için asfalt dolgu mastiklerinin reolojik özellikleri üzerindeki etkisi, frekans taraması ve çoklu basınç kayma geri kazanım (MSCR) deneyleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Diyatomitin geri kazanımı, 70 °C ve 76 °C'de ve her iki gerilim seviyesinde hidratlı kireç mastiğinden önemli ölçüde daha büyüktür. Bu da, diyatomit mastiğinin yüksek sıcaklıklarda deformasyonlarda (tekerlek izi) daha fazla iyileşme kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir. Sürünme deneyleri, dolgu maddesinin kullanımının, sertleştirme etkisini kontrol eden dolgunun sertliği nedeniyle tüm sıcaklıklarda ve gerilim seviyelerinde kalıcı deformasyona (tekerlek izi) karşı azalmış bir duyarlılık gösterdiğini de göstermektedir. MSCR deney sonuçları, hidratlanmış kireç ve diyatomit mastiklerin, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona karşı gelişmiş bir direnç gösteren önemli ölçüde düşük geri kazanılamaz uyum sergilediğini göstermiştir.

Zhu vd. (2018), diyatomit kireçtaşı tozu oranının sürdürülebilir kum asfalt kompozitinin mekanik ve anti deformasyon özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın amacı, diyatomitin kum asfaltın mekanik ve anti deformasyon özellikleri üzerindeki etkilerinin yanı sıra bu özelliklere göre alternatif bir mineral katkı maddesi olarak optimum diyatomit içeriğinin belirlenmesidir. SLD yöntemi ile diyatomitin kireçtaşına çeşitli hacim oranlarına sahip beş grup kum asfaltı (0: 1; 0,25: 0,75; 0,5: 0,5; 0,75: 0,25 ve 1: 0) belirlenmiştir. Bu beş kum asfalt grubu AM-0, AM-25, AM-50, AM-75 ve AM-100 olarak adlandırılmıştır. Diyatomit tüm dolgu maddesi oranının hacimce sırasıyla, %25, %50, %75 ve %100 hacim oranına karşılık gelmektedir. Statik basınç yöntemi (jtg f40-2004 2004) ile çeşitli diyatomit içerikli 50×50 mm ve $\phi 101 \times 63,5$ mm olmak üzere iki boyutta kum asfalt hazırlanmıştır. İlk olarak asfalt 170°C 'de fırında ısıtılmış, ayrıca dolgu maddeleri (diyatomit ve kalker) ve ince agregalar, malzeme sıcaklığı stabil durumuna gelene kadar 180°C etüvde ısıtılmıştır. İkinci olarak, ince agrega, dolgu maddesi ve asfalt, kademeli olarak karıştırma kabına dökülmüş, karıştırma sıcaklığı 170°C 'ye ayarlanarak; ince agregalar karıştırma kabında 90 sn karıştırılmış ve ardından karıştırma kabına asfalt dökülerek tekrar 90 sn karıştırılmıştır. Daha sonra dolgu, karıştırma kabına dökülmüş ve 180 sn daha karıştırılmıştır. Son olarak, karışımlar 3 kPa basınçta 3 dk boyunca bir kriko ile sıkıştırılmıştır. Asfalt kumun mekanik ve anti deformasyon özellikleri çeşitli oranlarda diyatomit içeren asfalt kompozitler, tek eksenli sıkıştırma deneyi, tek eksenli sıkıştırma tekrarlanan sünme deneyi ve sıradan kireçtaşı tozunun optimal değiştirme içeriğini belirlemek için düşük sıcaklıkta bir bölme deneyi ile araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kum asfaltlarının sıkıştırma mukavemeti, anti deformasyon özellikleri ve düşük sıcaklıkta çatlak direncinin diyatomit kullanılarak iyileştirildiğini gösterilmiştir. Yarıлма mukavemeti ne kadar yüksekse, düşük sıcaklıkta çatlama direnci o kadar iyidir. Bu nedenle, düşük sıcaklıkta çatlak direnci, diyatomit ilavesiyle geliştirilebilir. Bu gelişme, çoğunlukla, diyatomit asfalt mastiğinin yapışmasının kireçtaşı asfalt mastiğinden önemli ölçüde daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Diyatomit ilavesi optimum içeriği aştığında kum asfaltının yarıлма mukavemetinin de azalmasına neden olur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Düşük sıcaklıkta yarma testinin sonuçları (Zhu vd. 2018).

En uç nokta yaklaşık %50 diyatomit içeriğindedir. AM-50'nin yarılma gücü, AM-0'dan 1.37 kat daha yüksektir. SLD analiz sonuçlarına göre elde edilen optimum oran 0,327:0,673 olmuştur. Sonuç olarak, karşılık gelen anti deformasyon performansını iyileştirmek için asfalt kaplama yapımına diyatomit uygulamak faydalı olmuştur.

Güngör vd. (2019), diyatomit'in TMA karışımında kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, diyatomit, TMA karışımının segregasyonunun ve yoğun bitümün süzülmesinin önlenmesindeki etkisini görmek amacıyla, filler olarak karışıma eklenmiş ve karışımların performanslarına bakılmıştır. Ayrıca kıyaslama amacıyla fiberli TMA karışımlarında da aynı performans deneyleri yürütülmüştür. Diyatomit ve fiber katkı filler olarak iki tip TMA asfalt karışımı hazırlanmıştır. Diyatomit katkı TMA karışımına %3 oranında diyatomit, filler olarak eklenmiş ve fiber ilavesi yapılmadan diyatomit malzemenin TMA karışımlardaki etkisi araştırılmıştır. Normal TMA ile diyatomit katkı TMA karışımların performansları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, önce normal TMA ve diyatomitli TMA karışım dizaynları hazırlanmış ve iki tip TMA karışımı üzerinde; plastik deformasyonlara karşı davranışı belirleyen tekerlek izinde oturma tayini (TİO), yorulma ömrünün tespiti için dört nokta eğilmeli giriş eğme yöntemi ile yorulma deneyleri ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dayanımı belirleyen indirek çekme mukavemeti (İÇM) deneyleri uygulanmıştır. İlk olarak, her iki TMA karışım için Marshall yöntemine göre karışım dizaynı hazırlanmıştır. Bir karışım dizaynında %0,45 oranında fiber, diğer karışım dizaynında %3 oranında diyatomit filler eklenmiş ve fibersiz olarak hazırlanmıştır. Ayrıca %4 ve %5 oranlarında diyatomit filler eklenmesi ile de dizaynlar

hazırlanmıştır ancak işlenebilirlik zorlaşmış ve bitüm oranı çok artmıştır. Bu nedenle, %3 diyatomit uygun oran olarak seçilmiştir. Kullanılan diyatomit, etüvde kurutulduktan sonra kırılmış ve No:200 elekten elenmiştir. Sonuç olarak, her iki tip TMA karışımı, çekme dayanımı, sudan kaynaklanan hasarlara karşı davranış ve tekerlek izine karşı dayanım yönünden yaklaşık olarak benzer davranış göstermiştir. Fiberli TMA yorulmaya karşı daha iyi performansa sahiptir, özellikle 200x106 birim deformasyon seviyesinde, 2x106 döngüye kadar başlangıç rijitlik değerinin %70'ini korumuştur. Diyatomitli TMA'nın yorulma davranışı iyileştirmek için daha düşük oranda diyatomitli karışımlar incelenmelidir. Sonuç olarak diyatomitli TMA karışımının maliyetinin fiberli TMA'ya göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Yue vd. (2019), diyatomit ve lignin elyaf ile modifiye edilen bitümlü karışımların özelliklerini incelemiştir. Trafik yoğunluğunun hızla artması nedeniyle, yüksek dereceli otoyollarda aşırı yüklenme olgusu, tekerlek izi, termal çatlama ve su hasarı gibi kaplamada çeşitli problemlere neden olur. Bitümlü karışımlarının modifikasyonu, hasarlarını azaltmak ve asfalt kaplamanın performansını artırmak için en yaygın kullanılan çözümdür. Bu çalışmada, bitümlü karışımlarda modifiye edici olarak diyatomit veya lignin lifinin etkisi incelenmiştir. Seçilen katkı maddelerinin bitümlü karışımı performansı üzerindeki etkinliğini değerlendirmek için, tekerlek izi deformasyonu, dolaylı çekme, üç noktalı eğilme, donma çözülme, ayırma ve Marshal batırma gibi çeşitli deneyler yapılmıştır. Diyatomit ve lignin lifi, çeşitli katkı maddeleri arasından seçilmiştir. Diyatomit, yüksek gözenekli, düşük yoğunluklu, hafif, yüksek rezervli ve düşük maliyetli bir malzeme türüdür. Lignin lifi, geniş yüzey alanına, pürüzlü yüzeye ve yüksek ısı direncine sahip bir tür lifdir. Araştırmacılar daha önceki çalışmalarda, diyatomitin yüksek sıcaklıkta bitümlü karışımların performansını artırmada kilit bir role sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bitüm karışımlarının düşük sıcaklıkta çatlama direncine çok az etkisi vardır. Aksine, lignin lifi, bitüm karışımlarının düşük sıcaklık performansını artırabilir, ancak bazı araştırmacılar, lignin lifi ilavesinin bitüm karışımlarının yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Prosedür olarak, bitümlü karışımlarında katkı maddelerinin karıştırılması için iki yöntem mevcuttur: Kuru ve ıslak yöntem. Genellikle kuru yöntem, liflerle en çok uygulanan

yöntemdir. İlk olarak, lignin lifleri, lif dağılımını artırmak için sıcak agregalarla minimum 30 sn karıştırılır. İkinci olarak, bitüm yaklaşık 2 dk daha karıştırılırken eklenir. Bitümün yaşlanmasını önlemek için genel işlem süresi 6 dk'yı geçmemelidir. Diyatomit ve bitümün gerekli miktarda tartılarak 4 sa 135 °C'de etüvde bırakıldığı ıslak işlemle bitüm karıştırılabilir. Diyatomit ve bitüm daha sonra etüvden çıkarılır ve 15 dk boyunca 600 dev/dk hızda karıştırma ekipmanı ile karıştırılmıştır. Bitümlü karışımlarının düşük sıcaklıkta çatlama direnci, lignin lifi ilavesiyle artırılır ve bitüm karışımlarının yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncini biraz iyileştirir. Tek katkı olarak diyatomit kullandığında, düşük sıcaklık çatlak direncine bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Ancak diyatomit ile lignin lifi birlikte kullanıldığında, düşük sıcaklıkta çatlak sorunu lignin lifiyle çözülmüştür. Diyatomit ve lignin elyafı, bitüm karışımlarında su hasarı direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Önceki çalışmalara göre, optimum diyatomit miktarının %12-14 bitümlü bağlayıcı karışımına eklenebileceği ve optimum lignin lifi miktarının bitümlü karışımı bileşimi başına %0,2-0,4 olduğu belirtilmiştir. İnceleme ayrıca, tek katkı maddelerinin bitümlü karışımın genel performansını artırma kabiliyetine sahip olmadığını da belirtmiştir. Sonuç olarak, iki farklı katkı maddesinin birlikte kullanılması bitümlü karışımlarının genel performansını artırabilir, ancak tek modifikasyona yoğunlaşan önceki tüm araştırmalar nedeniyle karayolu mühendisliği uygulamasında hala başlangıç aşamasındadır.

Huang vd. (2019), kaya asfalt ve diyatomit içeren bitümlü kompozitlerin reolojik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada Kuzey Amerika kaya asfalt kompozit diyatomit ile modifiye edilmiş bitümün yüksek ve düşük sıcaklık reolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmalarında B60/80 sınıf petrol bitümüne %10 mineral dolgu, ağırlıkça %18 RA, %13 RA+%7 diyatomit ve %16 RA+%9 diyatomit ilave edilmiştir. Önce bitüm 150 °C'da ısıtılmış ve daha sonra mineral, RA ve RA + diyatomit, oda sıcaklığında petrol bitümüne ilave edilmiştir. Karışım ısıtılıp ve 175 °C'da 1 saat bekletildi. Sonra yüksek karıştırıcıyla 3000 rpm de 30 dk karıştırılmıştır. Petrol bitümüne RA ve diyatomit eklenmesinin bitüm örneklerinde görünen viskoziteyi, dinamik kesme modülünü ve tekerlek izi deformasyon direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, DSR deneyi, RA ve diyatomit ile modifiye bitümlerde yorulma performansında hafif bir azalma olduğunu ortaya çıkarılmıştır (Çizelg 2.8).

Çizelge 2.8 Dönel viskozite testi (Huang vd. 2019).

Bileşen	Dönel viskozite deneyi	
	Görünür viskozite (Pa s)	
	135 °C	175 °C
Kontrol	0,41	0,08
18% RA+%0 diyatomit	2,55	0,18
13% RA +%7 diyatomit	1,84	0,25
16% RA +%9 diyatomit	3,78	0,41

Bitüme diyatomit ilavesi bitümün yumuşama noktasını ve viskozitesini artırabilir, penetrasyonunu azaltabilir. RA ve diyatomit ilavesi, petrol bitümlü bağlayıcıların görünür viskozitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve deney sıcaklığı 175 °C olduğunda, %13 RA +%7 diyatomit kompozitle modifiye edilmiş bitümün görünen viskozitesi, petrol bitümünden % 212,5 daha yüksek olduğunu göstermiştir. %16 RA+%9 diyatomit ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi indeksi ($G^*/\sin\delta$), sıcaklık tarama deneylerinde petrol bitümünün yaklaşık 20 katıdır. -12 °C’de, %13 RA +%7 diyatomit kompozitle modifiye edilmiş bitümün m değeri, petrol bitümünden %20,7 daha düşüktür. Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performansı, RA ve diyatomit ilavesiyle zayıflamıştır. Araştırmalar, iki tür malzeme ile modifikasyonun, bitümlü kaplamanın performansını iyileştirmede etkili olduğunu, ancak tek bir malzeme ile iyileştirmede hala birçok eksiklik olduğunu göstermektedir. İki tür malzemenin birleştirilmesi, eksikliklerinin üstesinden gelebilir ve diyatomitin absorpsiyon işlevinden ve kaya asfaltının yüksek sıcaklık performansından tam olarak faydalanır. Kaya asfalt ve diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm karışımların kaplama performansını değerlendirmiş ve karışımının dinamik stabilitesinin iyileştiği bildirilmiştir; karışım diyatomit içeriği %20 olduğunda nem kararlılığı daha üstündür. Diyatomit ile modifiye edilmiş bir bitümlü karışımının yüksek sıcaklık performansı ve nem hasarı direnci önemli ölçüde iyileştirilmiştir, ancak düşük sıcaklık performansında aynı etki görülmemiştir.

Abdul Hasan vd. (2019), diyatomit ve atık motor yağı içeren bitümün fiziksel özellikleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Bitümün reolojik özelliklerini iyileştirmek için ya da bir katkı maddesi olarak modifikatör eklenmesi, potansiyel olarak yol yapımında kullanılan geleneksel bitümün performansını artırabilir. Çalışmada, diyatomit katkı maddesi ve atık

motor yağı (WEO) ile modifiye edilmiş bitüm 80/100 penetrasyon sınıfı olan fiziksel özelliklerini karakterize etmişlerdir. Bitüme %1 diyatomit ile farklı WEO yüzdeleri, yani %1, %2 ve %3 ilave edilmiş, geleneksel ve modifiye edilmiş bitüm numuneleri penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve ısıtma kaybı deneyleri uygulanmıştır. Dolayısıyla bitümü etüvde ısıtılmış, ve karıştırıcıda WEO ile 1.000 rpm hızında karıştırılmıştır. Sıcaklık 150 °C ile 160 °C arasında tutulmuş, diyatomit daha sonra sabit bir sıcaklık ve 3.000 rpm hızla yavaşça ilave edilmiştir. Çalışmada, diyatomit içeriği %1 olarak sabitlenmiş, buna karşın WEO yüzdesi karışımın ağırlıkça (400 g) %1, %2, %3 farklı oranlarda değiştirilmiştir. Üretilen kontrol numunesinin toplam ağırlığı, 400 g'da muhafaza edilmiş ve WEO diyatomit yüzdeleri, kontrol numunesinin toplam ağırlığı esas alınarak hesaplanmıştır. Homojen bir karışım elde etmek için karıştırma işlemine 30 dk yapılmıştır. Sonuçlar, çeşitli içeriklerde WEO eklenmesinin bitümün sıcaklık duyarlılığını önemli ölçüde etkilediğini açıkça göstermiştir. WEO içeriği %1'den %3'e çıktıkça penetrasyon değeri kademeli olarak artarken, modifiye bitümün yumuşama noktası azalmıştır. WEO içeriğindeki artışın, özellikle modifiye bitümde %3 oranında artmasının, modifiye edilmemiş numuneye göre daha düşük yumuşama noktası ve daha yüksek ısıtma kaybı ile bitümü yumuşattığını göstermiştir. WEO ilavesi bitümün viskozitesini düşürmüş, 165 °C'lik daha yüksek sıcaklıkta, diyatomit, WEO'nun viskozite azalmasını önemli ölçüde etkilediği 135°C'lik sıcaklıkta test edilen numunelere göre bitüm yapısının güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Zhang vd. (2019), fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi kullanılarak diyatomitle modifiye edilmiş bitümün yaşlandırma mekanizmasını araştırmışlardır. Çalışmada, diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm (DMA), yüksek hızlı kesme yöntemi kullanılarak hazırlanmış, kısa vadeli saf bitüm ve DMA'nın termo oksidatif yaşlanma mekanizması FTIR tekniği kullanılarak incelenmiştir. Modifiye edilmiş bitümlü karışımlar %5, %10 ve %15 diyatomit içermektedir. Diyatomitin bitümün yaşlanmasını geciktirici özellikleri üzerindeki etkileri, absorpsiyon piklerinin yoğunluğundaki değişiklikler aracılığıyla analiz edilmiştir. Karışım için bitümlü bağlayıcı olarak kullanılan AH-90 Çin'in Liaoning Eyaleti, Panjin Petrokimya Endüstrisinden temin edilmiştir. Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümün (DMA) hazırlanma prosedürü şu şekildedir; Öncelikle bitüm bağlayıcısı, 4 saat boyunca bir yağ banyosu ısıtma kabında 150

°C'de ısıtılmıştır. Daha sonra sırasıyla %5, %10 ve %15 diyatomit (ağırlıkça) bitüme ilave edilmiştir. Yeterli, homojen bir karışım sağlamak için 4000 rpm yüksek hızlı kesme ekipmanı kullanılarak 40 dk karıştırılmıştır. Sonuçlar, diyatomitin bitümlerle karıştırılmasından sonra yeni fonksiyonel grupların oluşmadığını göstermiştir. Diyatomit, fiziksel adsorpsiyon fonksiyonunun bir sonucu olarak bitümün yaşlanma sürecini engelleyebileceğini göstermiştir. Diyatomit bitüm yaşlanmasının engellemesi, diyatomit içeriği %10 daha az olduğunda hızla artmıştır. Modifiye edilmiş bitümün yaşlanma direnci, diyatomit içeriği %10 olduğunda en iyisi olduğunu göstermiştir. Diyatomitle modifiye edilmiş bitümün en yüksek değeri ve yaşlanmayı geciktirme amaçlı en uygun diyatomit dozajı saptanmıştır. Özetle, diyatomit, bitümün termal oksidatif yaşlanma direncini bir dereceye kadar iyileştirebileceğini göstermiştir. Yaşlanmanın neden olduğu hizmet ömrünün azalmasını önleyebilecek diyatomit modifiyeli bitümlü karışım yapmak anlamlıdır.

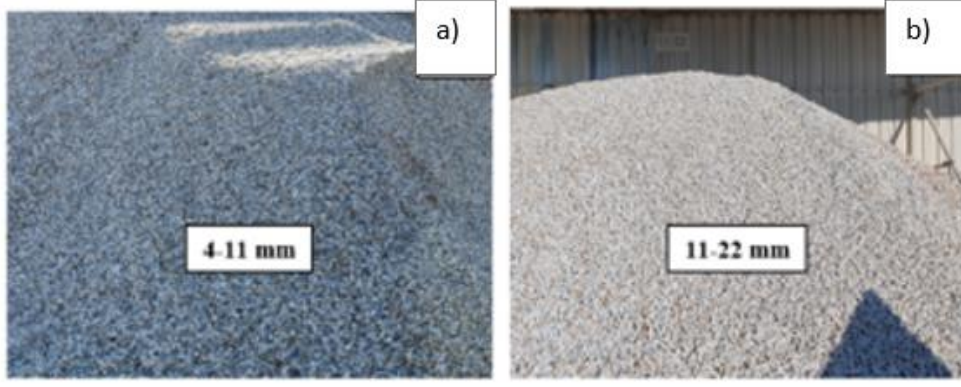
Daha önce yapılan çalışmalardan görüldüğü gibi diyatomit katkısının tek başına modifikatör olarak kullanılmış bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma ile ilk kez Türkiye seydidiler (Afyonkarahisar) diyatomitleri bitüm modifikatörü olarak kullanılmış ve bitüm reolojik özelliklerinde meydana gelen olumlu değişiklikler laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Agregas

Agrega olarak kireçtaşı kullanılmış olup, 4-11 mm ve 11-22 mm olarak Afyonkarahisar KOLSAN AŞ'den temin edilmiştir (Resim 3.1). Çalışmada 19-12.5 mm, ve 9.5-4.75mm elekler arasında kalan, Vialit, Nicholson deneylerine uygun kübik şekilli kireçtaşı agregalar yıkanıp 24 saat kurutulup kullanılmıştır.



Resim 3.1 Kireçtaşı agregası, a) 4-11 mm. b) 11-22 mm.

Çizelge 3.1 Agregas fiziksel ve mekanik özellikleri (Korkmaz 2021).

Agregas Deneyleri	Değerler
İri Agregas Hacim Özgöl Ağırlık (>No:4)	2,683
İri Agregas Zahiri Özgöl Ağırlık (>No:4)	2,710
İnce Agregas Hacim Özgöl Ağırlık (No:4 – No: 200)	2,671
İnce Agregas Zahiri Özgöl Ağırlık (No:4 – No: 200)	2,699
Filler Zahiri Özgöl Ağırlık (<No: 200)	2,738
Su Emme Deneyi (%) (>No:4)	0,4
Su Emme Deneyi (%) (No:4 – No:200)	4,0
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	23,1

3.1.2 Bitüm

Çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak Afyon belediyesi asfalt tesislerinden temin edilmiş olan, Aliğa Rafinerisi kökenli B50/70 sınıfı penetrasyon bitümü kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak seçilmiş olan, B50/70 özellikleri aşağıdaki çizilgede verilmiştir. Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak B50/70 penetrasyon sınıfı bitümlere farklı tabaklardan (KD1, KD2, KD3, KD4) alınan, farklı oranlarda (%7, 12, ve 17) diyatomit katılarak bitüm modifiye edilmiştir. Kullanılan bitümün genel özellikleri ise Çizelge3.1’de verilmiştir.

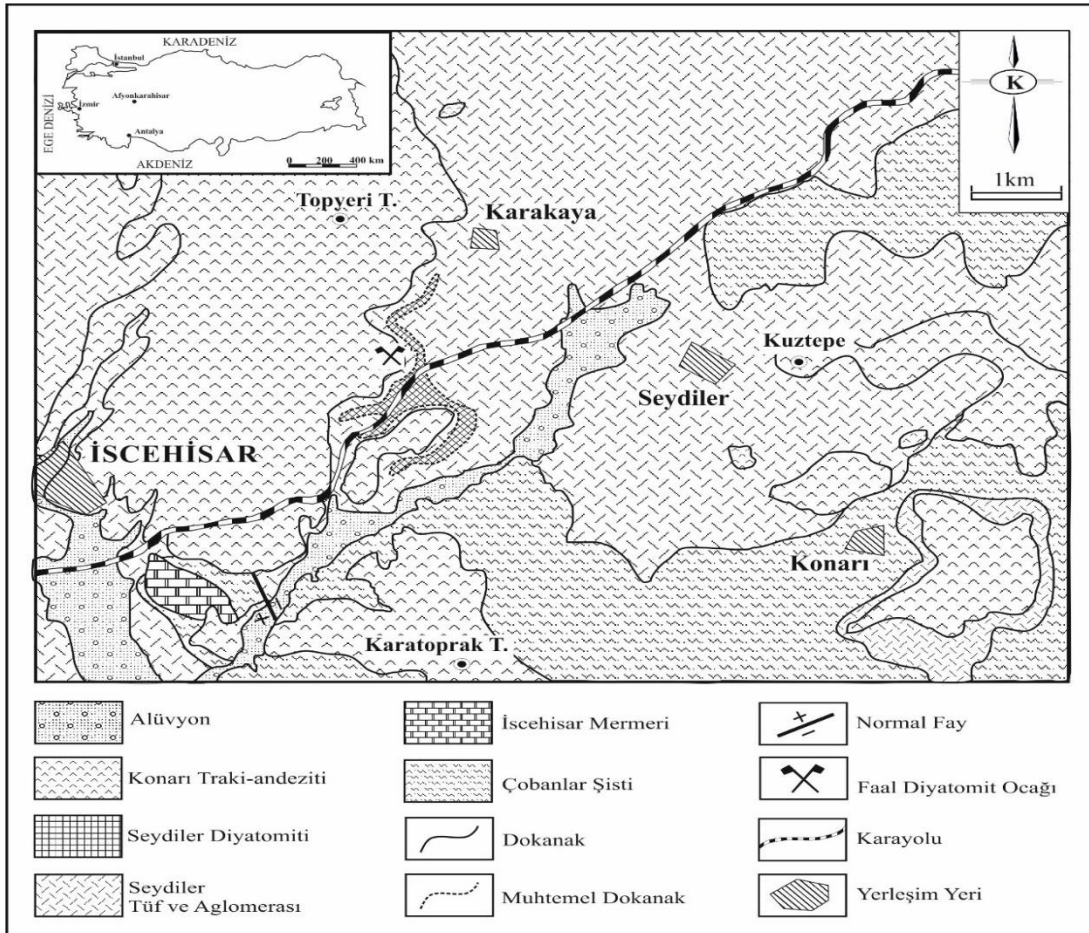
Çizelge 3.2 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri.

Özellikler	B50/70	Standart
Penetrasyon (25 °C)	52,13	(ASTM D70-03 2003)
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1,035	(ASTM D70-09 2009)
Yumuşama Noktası (°C)	46,65	(ASTM D36-09 2009)
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,98	
Viskozite (cP) (135 °C)	495	(ASTM D4402-06 2006)
Viskozite (cP) (165 °C)	131	
RTFOT Sonrası		
kütle kaybı		0,09
penetrasyon oranı		34
Yumuşama Noktası (°C)		52

Yapılan Deneysel çalışma diyatomit katkı maddesinin karıştırma yönetimi ile üretilmesi, modifiye bitüm numunelerinin hazırlanması ve üretilen modifiye bitümler üzerinde, penetrasyon (ASTM D5 / D5M – 13 2013; TS 1081 EN 12591), yumuşama noktası (ASTM D36/D36M-09 2009), özgül ağırlık (ASTM D70-09e1 2009), dönel ince film halinde yaşlandırma (RTFOT) deneyi, RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri (ASTM D2872-12e1 2012), dinamik kayma reometresi (DSR) (ASTM D7175 2015), dönel viskozite (RV) (ASTM D4402 2015), Nicholson soyulma uygulanmıştır. Çalışmaya ait yöntem akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.

3.1.3 Diyatomit

Çalışmada kullanılan diyatomit örnekleri İscehisar ilçesinin (Afyonkarahisar) Seydiler Kasabası'ndaki diyatomit yatağından alınmıştır. Seydiler bölgesinin ve diyatomit yatağının jeolojik özellikleri aşağıda verilmiştir. İnceleme alanının temelini Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfikleri oluşturmaktadır. Birim Çobanlar şisti ve İscehisar mermerlerinden meydana gelir. Metamorfik kayaların üzerine uyumsuzlukla gelen Orta-Üst Miyosen yaşlı volkanik kayalar altta beyaz, krem renkli tuf ve aglomera ile üstte ise siyahımsı, grimsi ve bordo renkli traki-andezitik bileşimli lavlardan oluşmaktadır. İnceleme alanının en genç birimi ise Kuvaterner yaşlı alüvyondur (Metin vd. 1987) (Şekil 3.1).



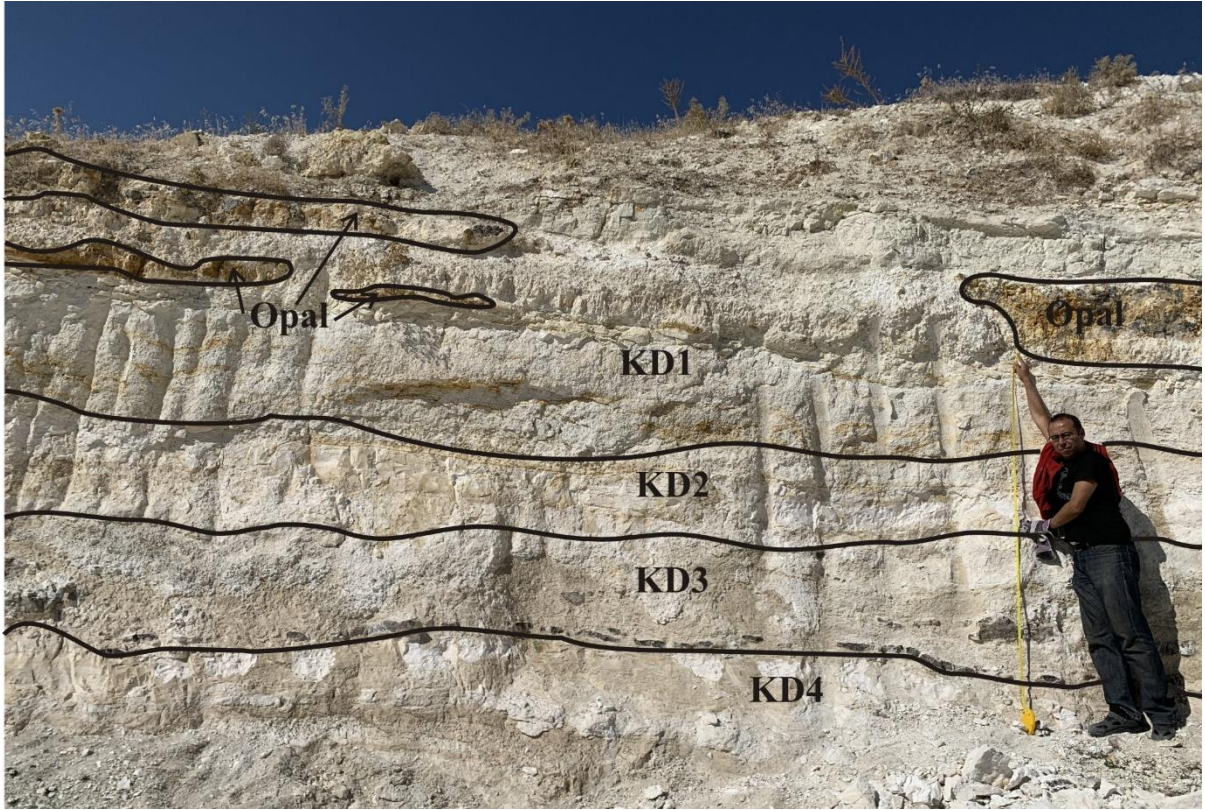
Şekil 3.1 İnceleme alanının jeoloji haritası (Metin vd. 1987; Yıldız, 1997'den değiştirilerek alınmıştır).

Temel kayaçların üzerine uyumsuzlukla gelen Seydiler tuf ve aglomerası, beyaz, sarımsı beyaz, krem ve gri renkli olup, çok kalın tabakalanmalar gösterir. Genellikle camdan oluşan matriks içerisinde birimde kuvars, sanidin, plajioklaslar, ve çubuğumsu şekilli biyotit fenokristalleri tespit edilmiştir. İncehisar ilçesi, Seydiler Kasabası ve Karakaya Mahallesi arasında kalan bölgede çalışmaya konu olan diyatomiti ara katkı olarak bulundurur.

Seydiler tufünün üstünde siyahımsı, grimsi ve bordo renkli, akıntı yapısı tablamsı konumu ile arazide kolay tanınan traki-andezitik bileşimli lavlar yer almaktadır. Söz konusu birim, Metin vd. (1987) ve Yıldız (1997) tarafından Karakaya bazaltı; Kuşcu vd. (2003) tarafından Ağın andeziti ve Kuşcu vd. (2006) tarafından ise Konarı traki-andeziti olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada ise söz konusu birim, Kuşcu vd. (2006) tarafından yapılan adlandırmaya uygun olarak Konarı traki-andeziti olarak isimlendirilmiştir. Metin vd. (1987) yaptıkları polarizan mikroskop çalışmasında, fenokristal olarak piroksen, muhtemelen ojit, biyotit, bazaltik hornblend (lambrolit), plajioklas (labrador) minerallerine rastlanmıştır. Hamur, camdan oluşmuş ve vitrofirik doku gözlenmiştir. Söz konusu çalışmada birimin yaklaşık kalınlığı 40 m olarak belirtilmiştir.

Seydiler tufünün üst seviyelerinde tüflerle ardalanmalı olarak Seydiler diyatomiti yer almaktadır. Birim bölgede yaklaşık 1.5 km²'lik alanda yayılım sunmaktadır. Tüflerle ardalanmalı diyatomit düzeyinin kalınlığı 26 m'ye kadar ulaşmaktadır (Yıldız vd. 1999). Beyaz, krem, sarı ve gri renkli olan birimin rengi, bazı bölgelerde içerisindeki klastik malzeme ve birime nüfuz eden demirli eriyikler nedeniyle yersel olarak koyulaşmaktadır. Diyatomitin üst seviyesinde 1,5-2,0 m kalınlığında opal seviyesi yer almaktadır. Çalışmada kullanılan diyatomit Karakaya Mahallesinde özel bir şirket tarafından işletilen ocaktan temin edilmiştir. Bu bölgede yatay konumlu olarak bulunan diyatomitin üst seviyesinde kalınlığı 30 cm ile 1m arasında değişen opal seviyesi yer almaktadır. Opal seviyesinin altında beyazdan kreme doğru değişen renklerde, yer yer sarı renkli demir ile kum boyutunda tuf içeren tuf içerikli diyatomit (KD1) bulunmaktadır. Daha aşağı seviyelerde ise sırasıyla beyaz renkli safsızlık oranı oldukça düşük 1m kalınlığında diyatomit (KD2), düşük oranda tuf ve siyahımsı kahve renkli opal kırıntıları içeren krem renkli, 1,5 m kalınlığında diyatomit (KD3) ve en altta ise kalınlığı

belirlenemeyen beyaz renkli, yer yer kırıntılı mineral içeren diyatomit (KD4) seviyesi gözlenmiştir (Resim 3.2). Çalışmada kullanılmak üzere her seviyeden 10 kg ağırlığında diyatomit örnekleri alınmıştır.



Resim 3.2 Seydiler (Afyonkarahisar) Karakaya Mahallesinde özel bir şirket tarafından işletilen diyatomit ocağında örnekleme yapılan seviyeler; (KD1): Krem renkli tuf içerikli diyatomit, (KD2): Beyaz renkli saf diyatomit, (KD3): Krem renkli tuf ve opal içerikli diyatomit ve (KD4): Beyaz renkli saf diyatomit.

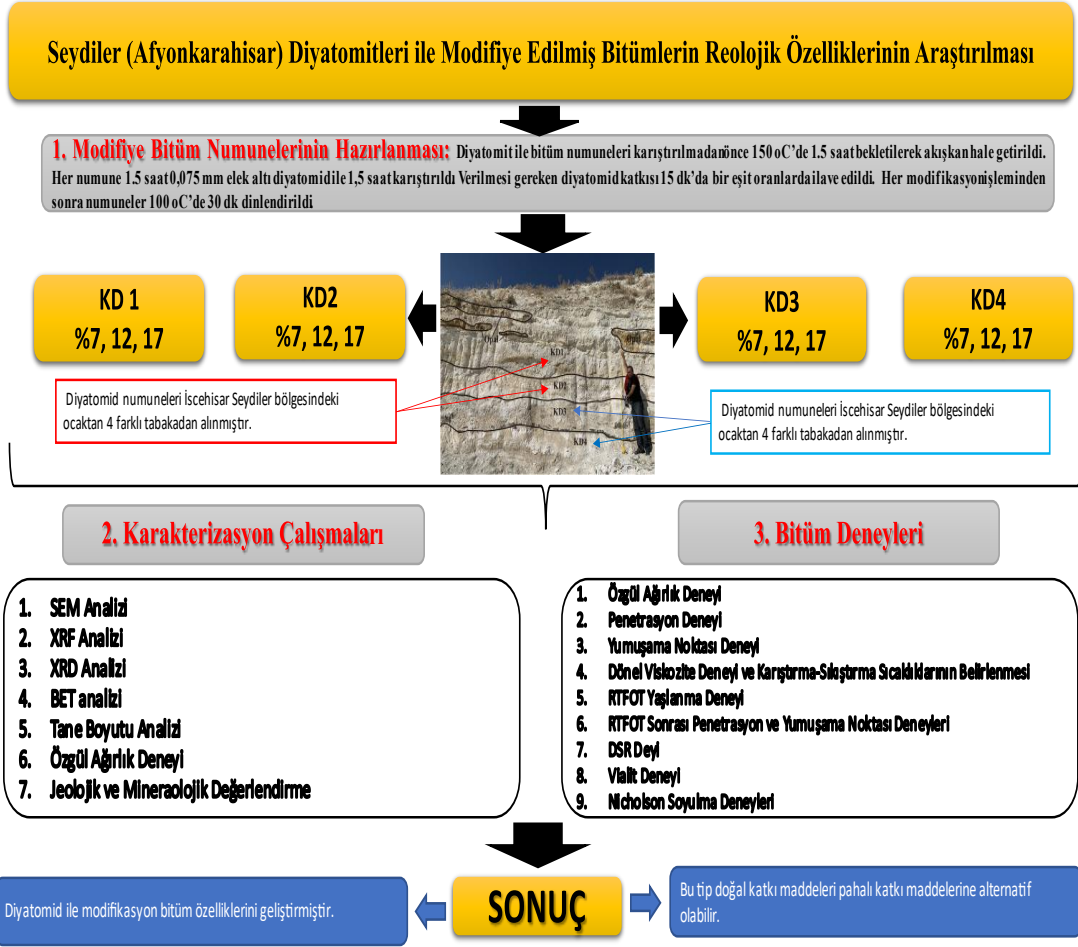
3.2 Yöntem

Afyonkarahisar Seydiler bölgesinden temin edilen farklı tabakadan alınmış (KD1, KD2, KD3, KD4) diyatomitleri. Literatürde belirtilen katkı oranları, karıştırma hızı, sıcaklığı ve süresi dikkate alınarak karıştırma prosesi oluşturulmuştur. B50/70 sınıfı penetrayon bitümüne ağırlıkça farklı oranlarda (%7, 12, ve 17) diyatomit katılarak 150-160 °C karıştırma sıcaklığında ve 1900 dev/dk hızında 1-30 sa boyunca karıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Karışım işleminden sonra modifiye edilmiş bitüm 100 °C etüvde 30 dk dinlendirilmiştir. Hazırlanan karışımlar üzerinde optimum katkı oranını belirlemek için penetrasyon, yumuşama ve dönel viskozite deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında

tasarlanıp yerli olarak üretimi yaptırılan tam kesmeli, bitüm modifiye mikseri kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalara ait akış yöntemi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.3 Sıcaklık ve devir kontrollü modifiye bitüm mikseri.



Şekil 3.2 Çalışma yöntem akış şeması

3.2.1 Diyatomit Örneklerinin Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan diyatomit örneklerinin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için örneklere taramalı elektron mikroskop (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), X-ışını floresans (XRF), tane boyut, özgül ağırlık, yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı analizleri yapılmıştır.

3.2.1.1 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri

Çalışmada kullanılan diyatomit örneklerinin mineralojik bileşim ile yüzey morfolojisinin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri yapılmıştır. X-ışınları difraktoğramı analiziyle paralel yürütülen taramalı elektron mikroskop (SEM)

incelemeleri için farklı mineralojik bileşime sahip ayrılmış örneklerden yaklaşık 1 cm çapında parçalar kırılmıştır. Böylece kayaç yapısını ve dokusunu temsil eden taze yüzeyler elde edilmiştir.

Örnek hazırlama işlemi sırasında insan hatasını önlemek için kayaçtan kırılan parçaların fazladan işleme tabi tutulmasına gerek yoktur. Örnekler ince altın filmle kaplandığında taramalı elektron mikroskoptan gelen aşırı elektrik yükü kontrol edilmiş olur. Böylece örneklerden daha kaliteli görüntü elde edilir (Keller vd. 1986).

SEM incelemeleri için 250-300 Å'da ince altın filmle kaplaması yapılan örneklerin, Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezindeki (TUAM) LEO VP-1431 model taramalı elektron mikroskobunda tanımlamaları yapılmıştır (Resim 3.4).



Resim 3.4 LEO VP-1431 model taramalı elektron mikroskobu.

3.2.1.2 X-Işınları Kırınımı (XRD) İncelemeleri

Diyatomit örneklerinin XRD incelemeleri için örnekler kurutma ve kırma işlemleri sonucu $-250 \mu\text{m}$ tane boyutuna öğütülmüştür. İnceleme alanına ait örneklerin XRD analizleri AKÜ Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM)'nde Shimadzu XRD-

6000 model X-ışını difraktometre cihazı (Ni filtreli, CuK α radyasyonlu) kullanılarak yapılmıştır (Resim 3.5). Analizlerde 40 kV (voltaj) ve 30 mA (akım) difraksiyon değerleri seçilmiştir. Numuneler 2°/dk'da taranarak 2°-70° (2 θ) goniometre kırınım açısı aralığında 2000 cps (intensity) pik yoğunluğunda analiz edilmiştir.



Resim 3.5 Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı.

3.2.1.3 X-ışını Floresans (XRF) İncelemeleri

Afyon kocatepe üniversitesi inşaat mühendisliği bölümü laboratuvarında öğütülerek 100 mikronluk elek altına geçen numunelerden jeokimyasal analizler için numuneler hazırlanmıştır. Öğütülmüş deney numuneleri afyon kocatepe üniversitesi mühendislik fakültesi maden mühendisliği bölümü doğaltaş analiz laboratuvarında rıgaku / zsx primus 2 model x-ışını floresans spektrometresi cihazı ile inceleme yapılarak majör element analizleri yapılmıştır.

3.2.1.4 Tane Boyut Analizi

Çalışmada kullanılan diyatomit örneklerinin tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla örneklerin tane boyut analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılan Malvern Mastersizer 2000 model cihazın teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Cihaz hem kuru, hem yaş ölçüm yapabilmektedir.
- - 100 µm arasındaki partikül boyut dağılımını tek bir lens ile ölçebilmektedir.
- Cihazda ışık kaynağı olarak 633 nm dalgaboylu He-Ne laser kullanılmaktadır.
- Cihaz 1000 tarama/saniyelik hızda ve 0,001 - 65 saniye arasında ayarlanabilen sürede ölçüm yapmaktadır.
- Cihaz, laser difraksiyon prensibi ile çalışmaktadır.
- ISO13320 standardına göre Mie Teorisi ölçüm tekniği kullanılmaktadır.
- Cihaz, kontrol edilebilir ultrasonik etkiye sahiptir.
- Cihaz, kümülatif elek altı / elek üstü dağılımları, frekans, histogram, Rosin-Rammler ve log-normal ve ihtimal eğrilerini vermektedir.
- Cihaz; elde edilen verileri başka marka/model cihazlarla veya başka tekniklerle (elek, sedimentasyon vb gibi) kolay karşılaştırabilmek için alınan sonuçların direkt çevrimini yapan bir Emülasyon Programına sahiptir.
- Software programı ile Tromp Eğrileri direkt olarak çizilerek Separatör verimliliği izlenebilmektedir.
- Software, sonuçları BS/ASTM/ISO elek değerleri olarak göstermekte, ayrıca özgül yüzey alanı, hacimsel ortalama çap, yüzey alansal ortalama çap, span, % 10, 50, 90 noktalarındaki hacimsel dağılım değerlerini göstermektedir.

3.2.1.5 Özgül Ağırlık Deneyi

Birim hacimdeki madde miktarına yoğunluk denir. Bir toz, bir kap içine konduğunda işgal ettiği hacim çok sayıda faktöre bağlıdır. Bunların başında partikül büyüklüğü ve yüzey özellikleri gelir. Partiküller kendi etrafında ve partiküller arasında boşluklar içerirler. Bir toz yatağı titreşim ve basınca maruz kalırsa, partiküller birinden diğerine

doğru bağıl olarak hareket eder. Yoğunluk; cevher hazırlamada, malzemenin stoklanmasında, zenginleştirilmesi sırasında ve depolanmasında büyük rol oynamaktadır.

Gaz Piknometresi: Belirli bir basınç altında helyum gazı ile doldurulan bir locada numunenin gözeneklerine helyum gazı dolması ve bu hacmin genişletilmesi ile numunenin hacmi ölçülür. Ancak bu hacme açık gözeneklilik dahil değildir. Toz haline getirilmiş örneklerden de gerçek yoğunluk ölçümü yapılabilceği için örnek eğer kapalı gözeneklilik içeriyorsa bu örnek öğütülerek gerçek yoğunluğu ölçülebilir.



Resim 3.6 Gaz piknometresi.

Bilinen miktarda He gazı referans bir hacimden (VR), numuneyi içeren bir hücre içine gönderilir. nce tozun bulunduğu hücreye He gazı gönderilir ve gazın bir taraftan girip diğer taraftan çıkması sağlanır. Bu durumda sistem atmosfer basıncındadır.

V_p =toz hacmi,

V_c =hcre hacmi,

n_a =gazın mol sayısı,

P_a =atmosfer basıncı (1 atm),

T_a =atmosfer sıcaklığı

$$P_a \times (V_c - V_p) = n_a \times R \times T_a$$

Sonra referans hacmi (VR) yaklaşık olarak 17 psi basınca ulaşacak kadar doldurulur. Piknometre ölçümü için kullanılan gazın ideal olduğu kabul edilebilir. Özellikle helyum gazının kullanımı önerilmekle beraber Azot gazı da uygulamalarda kullanılabilir.

Geniş bir kalibrasyon numune hücre boyutuna sahip olan piknometre bu sayede, farklı boyutlarda birçok analizin yapılmasını sağlar. Kalibrasyon, operasyon valfleri ve sonuçların hesaplanması tamamen otomatik olarak yapılmaktadır. Numuneler hızlı ve otomatik olarak istenen yüzde değişime ulaşıncaya kadar analize tabi tutulabilirler. Analizlerin doğru yapılabilmesi için ortam sıcaklığının bilinen ve uygun bir değerde olması gerekir.

Gerçek (piknometre) yoğunluğunun belirlenmesi: Çalışmada kullanılacak tozların ve elde edilecek numunelerin gerçek yoğunlukları micromeritics otomatik gaz piknometresi kullanılarak belirlenir. Toz veya bulk numunelerinden bir miktar alınarak belirli bir sıcaklıktaki etüve kurutulmak üzere yerleştirilir. Bu işlem bitiminde, piknometrenin 1, 3.5 veya 10 cm³ kapasiteli hücrelerinden biri hassas terazide tartılarak ağırlığı piknometre cihazı içerisindeki programa girdi olarak kaydedilmek üzere bir kenara yazılır ve hücre ağırlığının darası alınır. Piknometre hücresinin darası alındıktan sonra içerisine ince uçlu spatula yardımıyla kurutulmuş olan numune ile doldurulur. Numunenin hücre içerisine doldurulmasında herhangi bir sıkıştırmaya maruz bırakılmamasına dikkat edilmelidir. İçerisinde numune bulunacak olan piknometre hücresi, bir de bu şekilde tartılarak ağırlığı yine cihaz içerisindeki programa girdi olarak kaydedilmek üzere bir kenara yazılır. İçinde numune bulunacak olan piknometre hücresi cihaz içerisine yerleştirilir ve cihazda kullanılmak üzere olan tüp içerisindeki helyum gazı açılır. Cihaz içerisindeki programa, hücre boyutu, örnek ağırlığı, numune ismi gibi parametreler girilerek ve sonra yine bu program klavuzluğunda analiz başlatılabilir. Yaklaşık 20-30 dk süren olan analiz neticesinde cihaz içerisine yerleştirilen numunenin hacmi ve yoğunluğu belirlenmiş olur (ASTM D5550-14,2014).

3.2.1.6 Yüzey Alanı ve Gözenek Boyut Dağılımı Analizi

Çalışmada kullanılan diyatomitlerin ve elde edilen ürünlerin bet yüzey alanları ve gözenek boyut dağılımları quantachrome nova 2200 serisi yüzey alanı ve gözenek boyut analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Adsorplanan gaz olarak % 99.999 saflıkta azot gazı kullanılmıştır. Yüzey alanı ölçüm işlemi iki ana basamaktan oluşmaktadır. Bunlardan ilki gaz uzaklaştırma işlemidir. Yeterli miktarda örnek ölçüm hücresine koyularak, vakumda 120 °C’de en az 6 saat süreyle gaz uzaklaştırma işlemi yapılmıştır. Böylece katı yüzeyinde ve açık gözeneklerde bulunan nem ve gazlar uzaklaştırılmıştır. Ardından cihazın uygun istasyonuna yerleştirilen gazı uzaklaştırılmış hücre içindeki katı örneğin 51 adsorpsiyon kapasitesini belirlemek için tamamen otomatik olan sistemin “bilgi girişi” tuşlarından gerekli veriler girilmiştir. Bu işlemlerden önce adsorpsiyonun gerçekleştiği hücrenin daldırılacağı sıvı azot kabı (dewar kabı) sıvı azot (77 k) ile doldurulmuştur. Adsorpsiyon/desorpsiyon süreci boyunca elde edilen ölçüm verileri, doğrudan bilgisayara kaydedilmiştir. Bet yüzey alanları, 0,05-0,30 bağıl basınç (p/p_0) aralığında n₂ adsorpsiyon verileri kullanılarak çok nokta, gözenek boyut dağılımları ise adsorpsiyon/desorpsiyon verileri kullanılarak, bjh Barret vd. (1951) yöntemlerine göre belirlenmiştir (quantachrome nova 2200 paket programı).

3.2.2 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerinde Uygulanan Deneyler

Kullanılacak bitümlerin özelliklerini belirlemek ve diyatomit ile modifiye bitüm numunelerinde özelliklerini ve optimum katkı oranını belirlemek amacıyla özgül ağırlık, penetrasyonu, yumuşama noktası, dönel viskozimetre, dönen ince film halinde yaşlanma, yaşlanma sonrası yumuşama noktası ve penetrasyonu, dinamik kesme reometresi (DSR) ölçümleri, Vialit yapışma ve Nicholson soyulma deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1 Bitüm Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM D70-03 (2003), yöntemi ile bitümün özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Prosedür;

1. Piknometre kapağı ile beraber tartılır ($A_{bitüm}$),
2. Piknometre içerisi $25 \pm 0,5$ °C’de saf su ile doldurulup, kapağı kapatıldıktan sonra kurulanır ve tartılır ($B_{bitüm}$),
3. Piknometre, kapağı ile beraber etüvde kurutulup soğumaya bırakıldıktan sonra içerisine bitüm konulup kapağı kapatılır ve tartılır ($C_{bitüm}$),
4. İçerisinde bitüm olan Piknometre içerisi tamamen $25 \pm 0,5$ °C’de saf su ile doldurulup, kapağı kapatılır ve Sıcaklık hassasiyeti $\pm 0,5$ °C olan su banyosunda 30 dakika bekletilir.
5. Su banyosundan çıkarılan Piknometre içerisindeki eksilen su tamamlanıp, dış yüzü kurulandıktan sonra tartılır ($D_{bitüm}$).

Bitüm numunesinin zahiri özgül ağırlık değeri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanılmıştır.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E_{bitüm}}{(B_{bitüm} - A_{bitüm}) + (D_{bitüm} - C_{bitüm})} \quad (3.1)$$

Burada;

$A_{bitüm}$ = Piknometre ağırlığı (gr),

$B_{bitüm}$ = Piknometre + su ağırlığı (gr),

$C_{bitüm}$ = Piknometre + bitüm numunesi ağırlığı (gr),

$D_{bitüm}$ = Piknometre + bitüm numunesi + su ağırlığı (gr).



Resim 3.7 Bitüm özgül ağırlık piknometresi deney aşamaları.

3.2.2.2 Penetrasyon Deneyi

Bir bitüm numunesinin yoğunluğu (kıvamı), 0,1 mm'lik standart iğnenin, bilinen yükleme şartları, zamanı ve ısısı altında, bitüm numunesine batırılmasıyla batma derinliği ile belirlenir. Bu derinliğe penetrasyon değeri denir. Penetrasyonun artması, bitümün yumuşaklığının artması anlamına gelmektedir. B 50/70, penetrasyon bitümleri içerisinde en çok tercih edilenler bitümleridir. Bitüm penetrasyon deneyi, bitümlü malzemenin sertliğini ve kıvamlılığını belirlemektir. Bitümlü bağlayıcılar arasında düşük kıvamlı penetrasyon bitümlerinin soğuk iklimli bölgelerde, yüksek kıvamlı bitümlerin ise sıcak iklimli bölgelerde kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı "Penetrasyon Deneyi" ile tayin edilir. Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli bir süre içinde, belli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur. Penetrasyon birimi 0,01 cm'dir. Penetrasyon değeri 500'e kadar olan bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25 °C sıcaklıkta 5 sn süre ile 100 gr'lık bir yük uygulamaktadır. Penetrasyon değeri 500'ün üzerinde olan numuneler için deney 15 °C'de yapılmakta ve yükleme şartları değişmektedir (Resim 3.8).



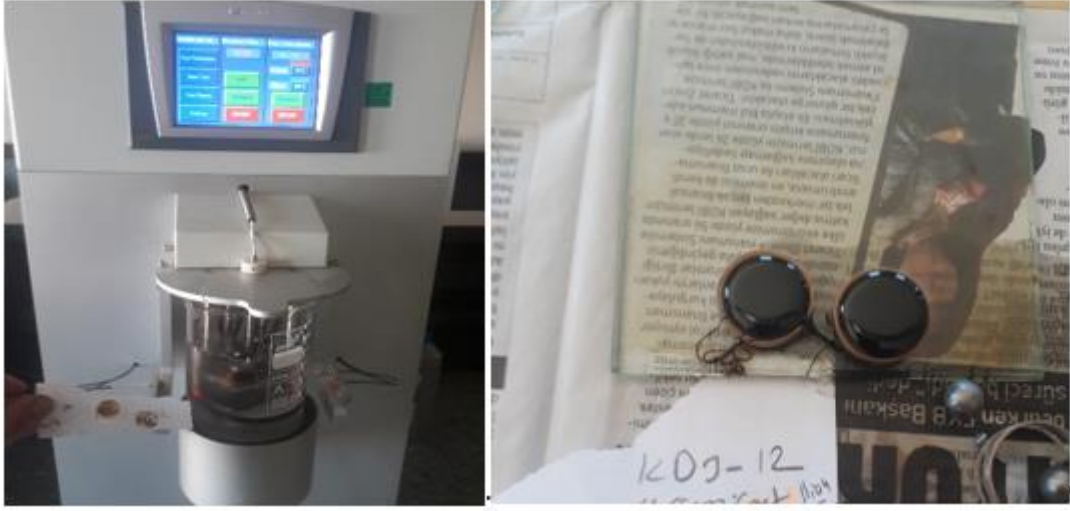
Resim 3.8 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları.

Bitüm numunesini 150 °C’da akışkan hale gelene kadar etüvde ısıtılır. kap içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırıldıktan sonra numune kabına aktarılır. Daha sonra numune derinliği iğnenin tahmin edilen batma miktarından en az 10 mm daha fazla olacak şekilde numune kabına doldurulmalıdır. Numuneler 1-1,30 sa 5-30 °C ortam sıcaklığında soğumaya bırakılır. Daha sonra numune kapları aktarma kabının içine konularak sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1-1,5 saat bekletilir. İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı penetrasyon cihazının tablası üzerine konularak İstenilen ağırlık ile yüklenmiş iğne numune yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır.

İğnenin ucu ve numunenin yansıma yüzeyi üzerinde uç uca temas edecek fakat numuneye batmayacak şekilde numune deneye hazır hale getirilir. Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az üç deneme yapılmalıdır. Bu denemeler 2 dk içinde yapılamaz ise numune ve aktarma kabı yeniden su banyosuna konular ve ölçümler yeniden yapılır. İğne her deneyden önce temizlenmelidir (TS 118 EN 1426, 2002).

3.2.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi

Bitümün belirli bir erime noktası yoktur. Isıtıldığında dereceli olarak yumuşar. Belirli bir erime noktası olmaması nedeniyle sıcaklık değişimlerini gösteren yumuşama noktası deneyi geliştirilmiştir. Bu test metodunun amacı, bitümün standart yük şartı altında katıdan işlenebilir bir akışkanlığa geçtiği sıcaklığı tespit etmektir. Bu deneyde, standart bir pirinç halka içerisinde bulunan bitüm numunesi üzerine çelik bir bilye 3,5 gr yerleştirilip, su veya gliserin banyosunda bırakılıp, sistemin standart oranda ısıtılması ve bilyenin deney plakasının tabanına değdiği noktadaki ölçülen sıcaklığı, yumuşama noktası sıcaklığı olarak belirlenir. Bitümün sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılıklarını ve hangi sıcaklıkta akmaya başladığını ölçmek için uygulanan deneydir yüzük ve bilye yöntemiyle yapılmıştır. Yumuşama noktası çok yüksek bitümlerin viskozitesi de yüksek olduğundan, sıcak karışım yapım sıcaklıkları da yüksek olmaktadır (ASTM D36/D36M-09 2009) (Resim 3.9).



Resim 3.9 Yumuşama noktası deney cihazı.

Bitümlü karışımların sıcak havalarda deformasyona uğraması bitümlü bağlayıcının yumusama noktasına bağlıdır. 25 °C daki penetrasyonları aynı olan iki bağlayıcıdan yumusama noktası yüksek olan sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Dolayısıyla kaplamada kullanılan bitümlü bağlayıcının yumusama noktası düşükse viskoz davranış ve kalıcı deformasyon erken başlar.

3.2.2.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Viskozite deneyi, uygulama sırasında bitümlerin ısıtıldıkları sıcaklık sınırlarında akma özelliğini tayin etmek amacıyla yapılır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Resim 3.9).



Resim 3.10 Dönel (Brookfield) viskozimetre (RV) deney cihazı (AKÜ İnşaat MÜH LAB).

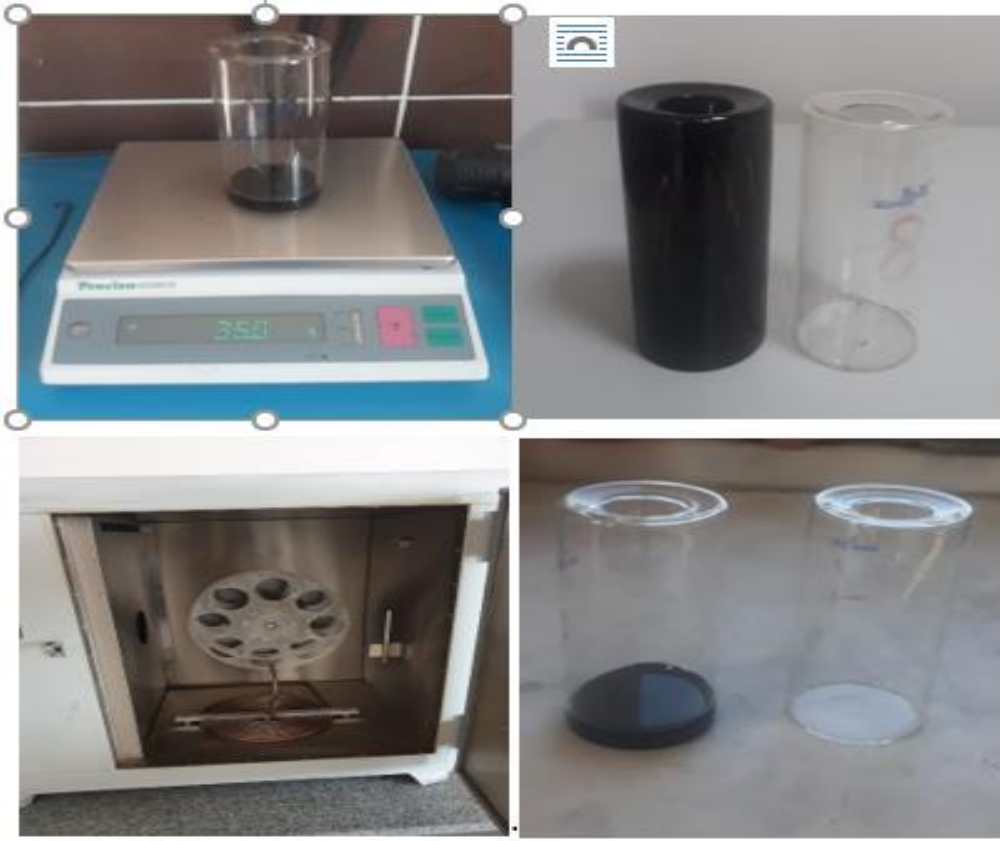
Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Dönel viskozite cihazında silindirik bir çubuk (spindle) sabit bir sıcaklıkta bitüm numunesi içine daldırılarak, kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma bilgisayar kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenir.

Deneyde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin, dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri elde edilmektedir. Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pas'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir. Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr. numune alınmakta ve sıcaklığı 150 °C'den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemedan yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulmakta, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numune 15 dk sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değerın ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Bu amaçla 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü

bağlayıcının $0,170 \pm 20$ Pa.s, sıkıştırılmasında ise $0,280 \pm 30$ Pa.s viskozite değerine sahip olması istenmektedir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır (ASTM D4402 2015).

3.2.2.5 Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi

Bitüm ısıtıldığında uçucu içeriğini kaybeden bağlayıcı bir malzemedir. Kaliforniya Karayolları idaresi tarafından geliştirilen RTFOT deneyinde düşey eksen etrafında dönen raf içerisine her biri 35 gr içeren 8 adet bitüm numunesi, 163 °C'de 85 dk boyunca ısıtma işlemine tabii tutulur (Şekil 3.11). Isıtma süresi sonunda numune tartılarak orjinal ağırlığın yüzdesine oranı ağırlık kaybı olarak ifade edilir. Kaplama karışımlarında kullanılan bitümlerin, ağırlık olarak %1'den fazla kayıp olmaması gerekir. Deney süresince numune şişelerinin içerisine sıcak hava üflenmektedir. Yapılan deney boyunca bitüm, her bir şişenin iç yüzeyinde 1,25 mm. kalınlığında film halinde sürekli olarak hareket etmektedir. Düşey ekseninde daire çizen raf, 15 dev/dk hızla dönmekte ve deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla etüv içerisine dakikada 4000 ± 200 ml/dk olacak şekilde ısıtılmış hava verilmektedir. SUPERPAVE yönteminde kısa dönem yaşlanmayı temsil etmek amacıyla kullanılan bu metot, ısı, hava ve sürekli hareket etme sayesinde yüzeyde bir katman oluşumunu engellemekte ve böylece bitümün korunmasını sağlamaktadır. Dönel ince film halinde ısıtma deneyinde (RTFOT) bitüm cam bir şişe içerisinden doldurularak yatay bir eksen etrafında döndürülmekte ve bu suretle yüzeyde tabaka oluşumu engellenmektedir. İnce film halinde ısıtma (TFOT) yönteminde ise 3,2 mm film kalınlığı kullanılırken RTFOT deneyinde bu kalınlık 1,25 mm'dir. Bundan dolayı RTFOT deneyi bitümün kısa dönem yaşlanmasını laboratuvar ortamında daha iyi temsil etmektedir (Ahmedzade vd. 2007).

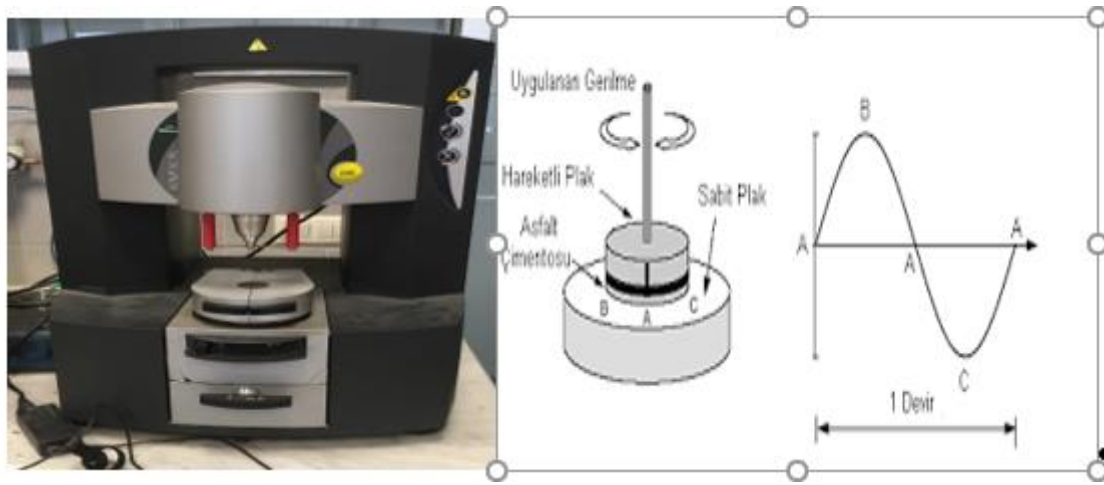


Resim 3.11 RTFOT deney cihazı (Afyon Belediye LAB).

3.2.2.6 Dinamik Kayma Reometre (DSR) Deneyi

Bu metot, dinamik kesme reometresi (DSR) kullanılarak bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin ölçülmesini sağlayan yöntemleri kapsar (Yüknü vd. 2020). Yöntem, bağlayıcıların kompleks kesme Modülü ve faz açılarının belirlenmesini içerir. Deney sonucunda karmaşık kesme çarpanı Normu, $|G^*|$, faz açısı, δ , belirli bir sıcaklık ve frekansta hesaplanabilir. Ayrıca bileşenleri olan G' , g'' , j' ve j'' değerleri bulunabilir. Tekerlek izine karşı dayanımın yüksek olması için G^* (Kompleks modülü) değerinin yüksek, faz açısının (δ) ise düşük olması gerekmektedir. Metot, yaşlandırılmamış, yaşlandırılmış ve geri kazanılmış bitümlü bağlayıcılar, katbekler ve emülsiyonlardan kararlı hale getirilmiş bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanabilir. Sıcaklık kontrollü ve bitümlü bağlayıcı numunelerinin bulunduğu deney düzeneğine belirli bir salınımlı kesme gerilmesi uygulanır. Gerilmeye bağlı bağlayıcının şekil değiştirmesi tayin edilir. Alternatif olarak deney numunesine belirli bir salınımlı kesme gerilimi uygulanır ve son kesme gerilmesi ölçülür. Bu deney lineer viskoelastik davranış bölgesinde uygulanır.

Integral sıcaklık kontrol sistemi ya da sıcaklık kontrol eklerinden oluşan deney süresince sıcaklığı $\pm 0,1$ °C hassasiyetle sıcaklığı 5 °C ila 85 °C aralığında muhafaza edebilen bir dinamik kesme reometresi kullanılır. Reometre, paralel plakalarla teçhizatlandırılmış ve plakaların alanları boyunca sabit bir boşluk bırakılmış olmalıdır. Sıcaklık kontrol sistemi, levhalar arasındaki sıcaklık farklarını önlemek için her iki plakayı da kapsamalıdır. Deney numunesi su haricinde bir sıvıya batırıldığında analiz edilecek malzemenin özelliklerini etkilememelidir. Reometre G^* değerini 1 ila 10 Mpa ($\pm \% 2$) ve faz açısını da (δ) 0° ila 90° aralığında ($\pm 0,1^\circ$) belirleyebilmelidir (Resim 3.12).



Resim 3.12 Dinamik kesme reometre Cihazı (DSR).

3.2.2.7 Vialit Yapışma Deneyi

Asfalt kaplamalarda agrega-bağlayıcı arasındaki adezyonun su etkisiyle azalmasını belirlemek amacıyla vialit yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca bu deney ile agregalarda soyulma ile ilgili de fikir verebilir. 19-12.5 mm elek arasında kalan agregalar elendikten sonra yıkanmış ve 100 °C'lik etüvde 24 sa kurutulmuştur. Bu suretle toz, nem gibi adezyonu olumsuz etkileyebilecek faktörlerin tüm numuneler için elimine edilmesi sağlanmıştır. Temiz ve kuru numuneler içerisinde şekli kübik olan 100 adet agrega seçilir. Mekanik sericiye her gözüne birer adet kübik agrega numunesi yerleştirilir. serici içerisindeki agregaların silindirme sıcaklıklarına ulaşması için etüve konur ayrıca kullanılacak bitüm ve çelik deney levhaları deneye başlamadan önce 160 °C'lik sıcaklıktaki etüvde ısıtılır. 40 gr asfalt ısıtılan levhalar üzerine döküldükten sonra bitüm

levhanın her tarafına düzgün bir şekilde yayılana kadar etüve konur. Bitüm yayılmış deney levhası mekanik sericiye yerleştirildikten sonra, agrega gözlerinin altındaki metal plaka süratle çekilmesi ile agregaların, 20×20 cm'lik metal plaka üzerindeki asfalt tabakası üzerine serbestçe düşmesi sağlanır. Silindirme, lastik bandajlı silindir kullanılarak, iki farklı yönde üçer defa olmak üzere toplamda 6 geçiş yapılır. Resim 3.13'de vialit deneyi aşamaları görülmektedir.



Resim 3.13 Vialit deney aparatları, numunelerin üretimi ve çelik bilya düşürülerek deneyin yapılması.

3.2.2.8 Nicholson Soyulma Deneyi

Bir asfalt kaplamanın ömrü, geniş ölçüde, suyun etkisine rağmen agreganın yapışma kabiliyetine bağlıdır. Soyulma, bağlayıcı maddenin, suyun ve trafiğin bir arada etkimesi ile agrega üzerinden ayrılması demektir.

Deneye, kırılmış agrega numunesinin 9,5-4,75 mm veya 4,75-3,35 mm'lik elekler arasında kalan kısmından yaklaşık 200 gr alarak, iyice yıkayıp saf su ile birkaç kere

çalkaladıktan sonra 110 °C lik etüve konarak başlanır. Yıkamış kuru agregadan $30\pm 0,5$ gr alınarak 1 saat 110 °C lik etüvede bekletilir. Diğer taraftan $1,5\pm 0,1$ gr bitümlü malzeme, 250 cm^3 beher içinde 110 °C lik kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Bitümlü malzeme eriyince etüvede ısıtılmış agrega hızlı bir şekilde behere dökülür ve bir cam bagetle bütün agrega tanelerinin üzeri homojen bir bitüm filmiyle kaplanıncaya kadar kum banyosu üzerinde iyice karıştırılır. Bundan sonra bitümlü agrega beher içinde kür işlemine tabi tutulmak üzere 24 sa 60 °C'lik beher içinde tutulur. Bu sürenin sonunda beher etüveden çıkarılıp, kum banyosunda hafifce ıslatıldıktan sonra 10 cm çapında petri kabına aktarılır.

Kaplanmış agregaların üzeri bagetle çok hafif darbelerle düzeltilir ve 10 dk laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Sonrasında petri kabı su ile doldurulur ve üzeri bir cam kapakla kapatılarak yine 24 sa bekletilmek üzere 60 °C'lik etüve konur. Bu sürenin sonunda petri kabı dışarı alınarak suyu değiştirilir. Yandan gelen bir ışık altında numunelerin üst yüzü gözle incelenir. Deney sonunda soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye oranı, soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir. Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre deney sonunda soyulmadan kalan numunelerin en az % 50'si soyulmadan kalmalıdır (Önal ve Kahramangil 1993, Gürer ve Kardeşin 2014). Resim 3.14'de nicholson soyulma deneyi numunelerinin hazırlanması görülmektedir.



Resim 3.14 Nicholson soyulma deneyi numunelerinin hazırlanması.

3.2.3 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti

Sıcaklığa hassasiyet, kıvam parametresindeki değişimin, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Termal ve foto oksidasyona çok meyilli olduklarından bitümlerde yüksek sıcaklık hassasiyeti istenmez. Penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite numarası (PVN) bitümün sıcaklık hassasiyetini ölçmek için kullanılabilen parametrelerdir (Mallick ve El-Korchi 2017).

3.2.3.1 Penetrasyon İndeksi (PI)

Penetrasyon indeksi (PI), penetrasyon ve yumuşama noktası testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanmaktadır. PI değeri genellikle -1 ve +1 aralığındadır ve daha yüksek bir PI daha düşük sıcaklık hassasiyeti gösterir. PI hesaplama ile ilgili klasik bir yaklaşım, aşağıdaki denklem (3.2)'de gösterildiği gibi verilmiştir (Hunter vd. 2015).

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 * \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (3.2)$$

Burada;

Pen_{25} = 25 °C'deki penetrasyon,

SP = Polimer Modifiye Bitümün (PMB) yumuşama noktası sıcaklığıdır.

3.2.3.2 Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN)

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

$$\text{Penetrasyon – Viskozite Numarası (PVN)} = \frac{\text{Log } L - \text{Log } X}{\text{Log } L - \text{Log } M} \cdot (-1,5) \quad (3.3)$$

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

$$\text{Log } M = 3,46289 - 0,61094 \cdot \text{log } P \quad (3.3b)$$

Burada;

X = 135°C'deki viskozite,

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

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

P = 25°C'deki penetrasyon, 1/10 mm.

4. BULGULAR

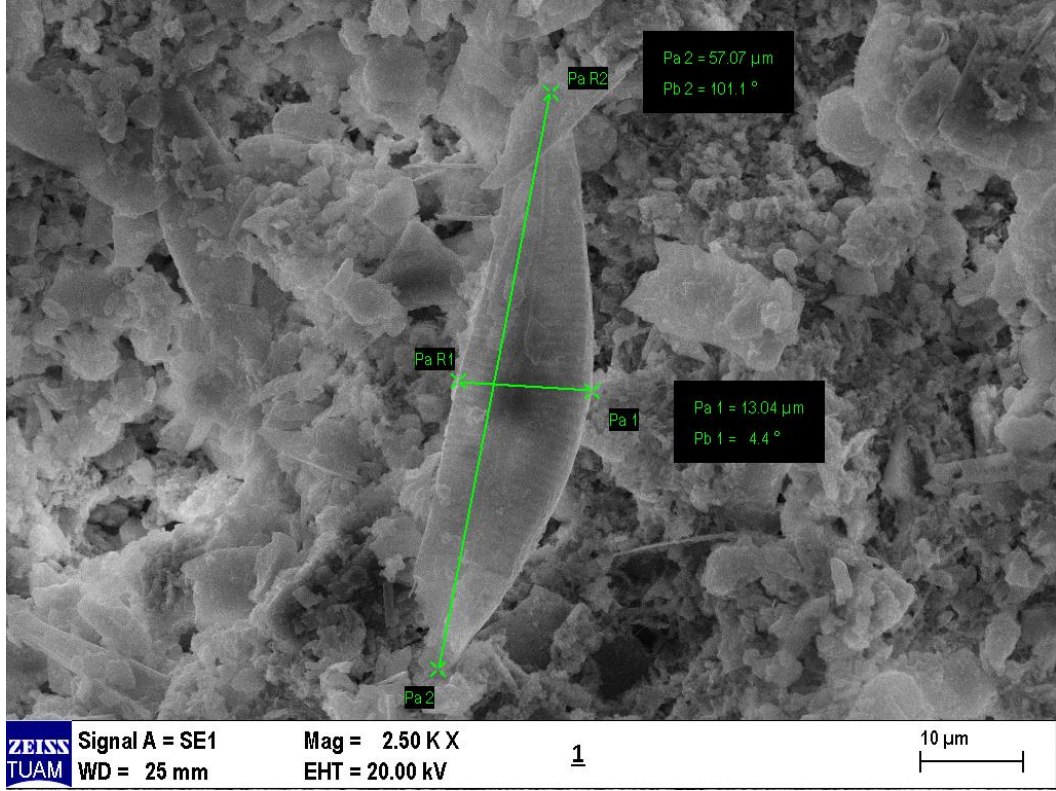
4.1 Diyatomit Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Deneylei

Çalışmada kullanılan diyatomit örneklerinin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için örneklere taramalı elektron mikroskop (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), X-ışını floresans (XRF), tane boyut, özgül ağırlık, yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı analizlerine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

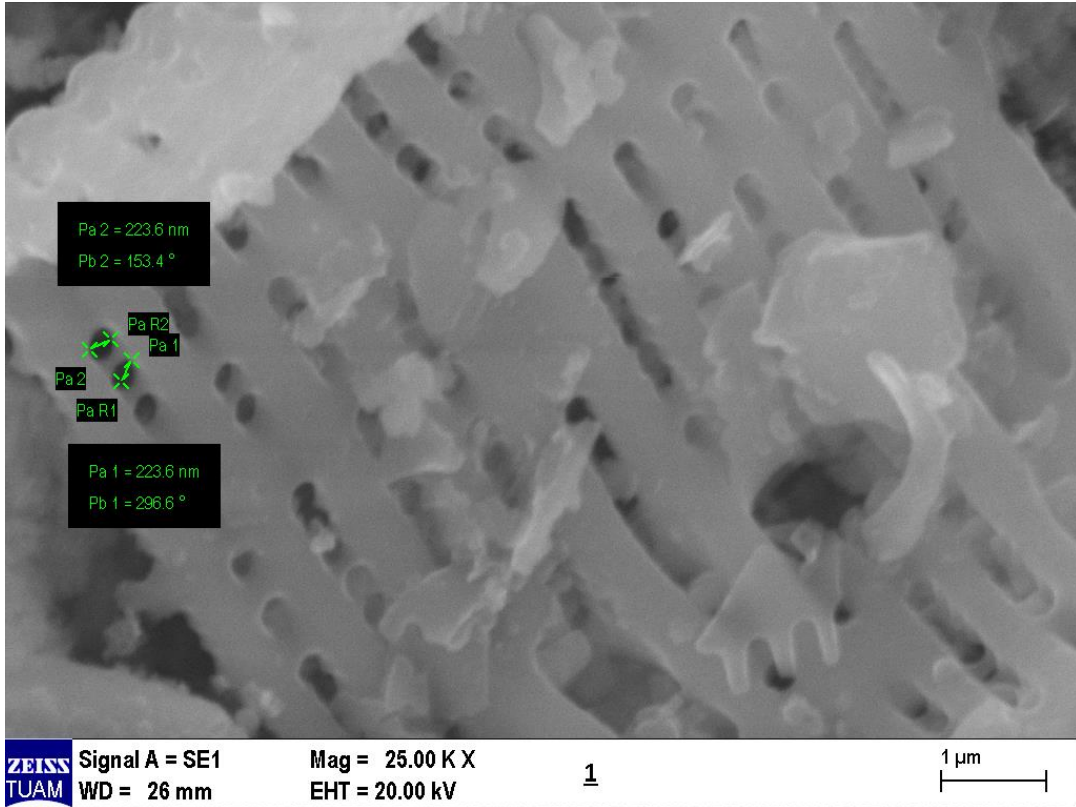
4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri

Modifiye bitüm deneylerde kullanılan diyatomitleri oluşturan farklı diyatomit türlerini belirlemek için, örneklerin taramalı elektron mikroskopunda incelemeleri yapılmıştır.

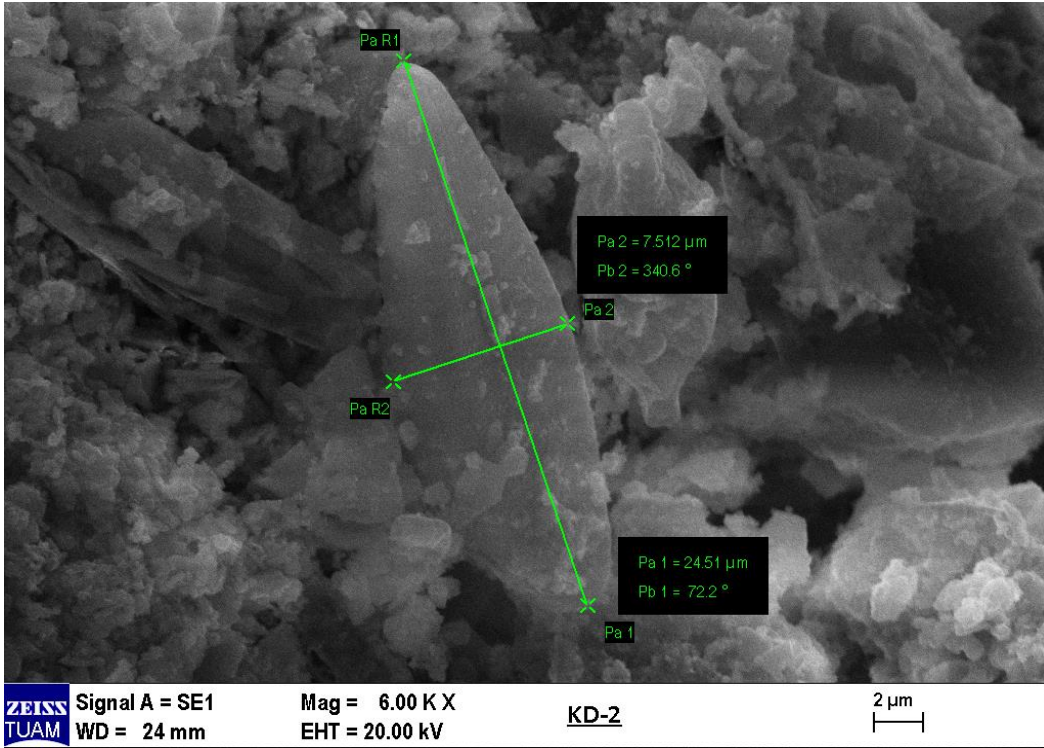
Örneklere çoğunlukla elips şekilli diyatomitler gözlenmiş olup, yer yer de küresel ve silindirik şekilli diyatomit türlerine de rastlanmıştır. Örnekler genellikle 12-49µm boyutlarındaki diyatomitlerden meydana gelmiştir. Kavkılar üzerindeki bu gözeneklerin genellikle nano boyutta olduğu ölçülmüştür. Söz konusu gözeneklerin diyatomitin modifiye bitüm absorbe özelliğini etkilediğini, bu durumun da bitüm özgül ağırlığına artışa sebep olduğu görülmüştür. Diyatomit kavkılar üzerindeki gözenekler 56-300nm boyutlarındadır (Resim 4.2). KD1, KD2, KD3 ve KD4 diyatomit numunelerine ait SEM görüntüleri sırasıyla Resim 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'de verilmiştir.



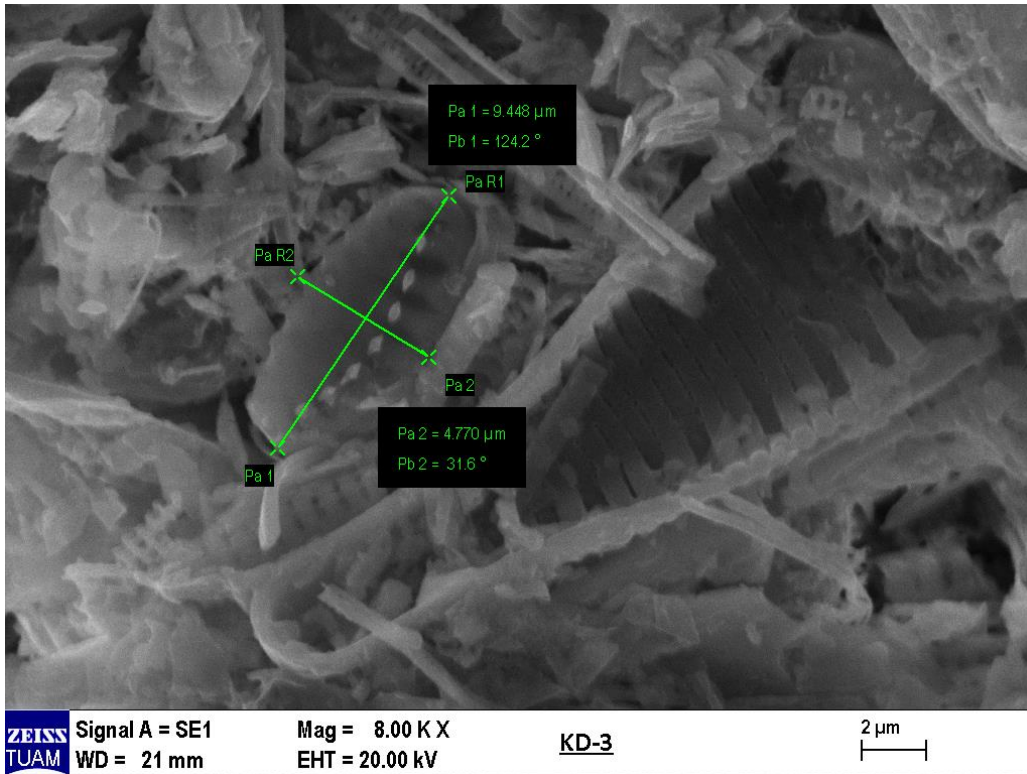
Resim 4.1 KD1 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.



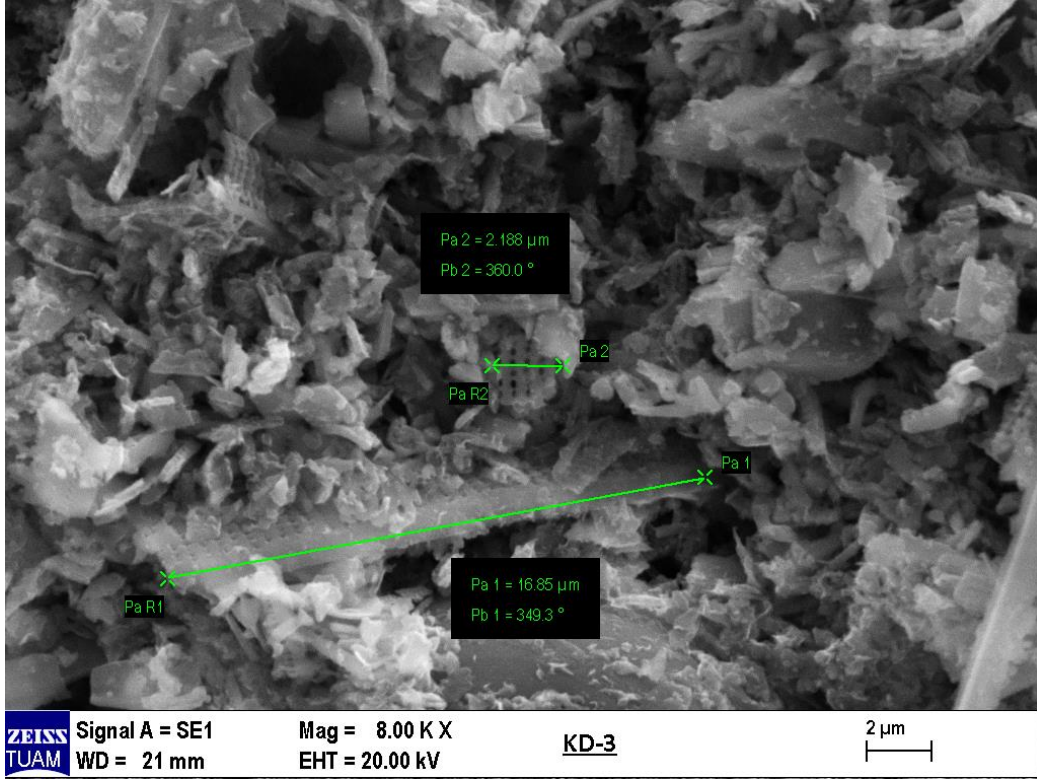
Resim 4.2 KD1 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.



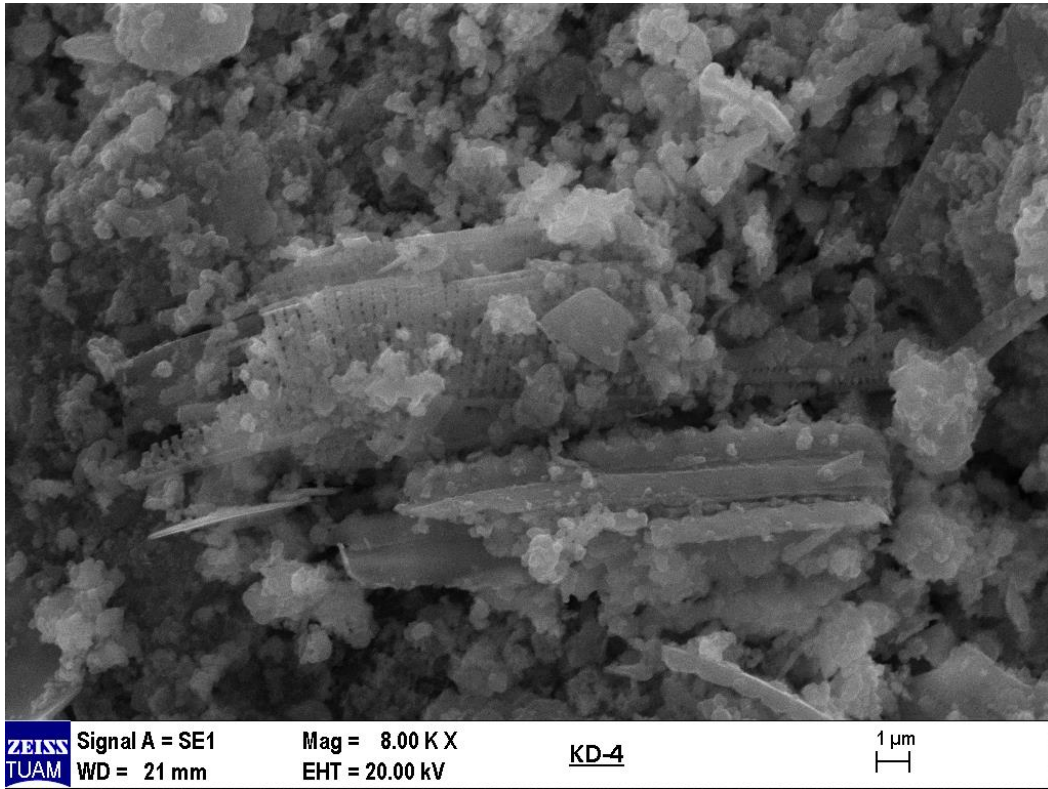
Resim 4.3 KD2 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.



Resim 4.4 KD3 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.



Resim 4.5 KD3 Diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü ve gözenekli kavkı yapıları.



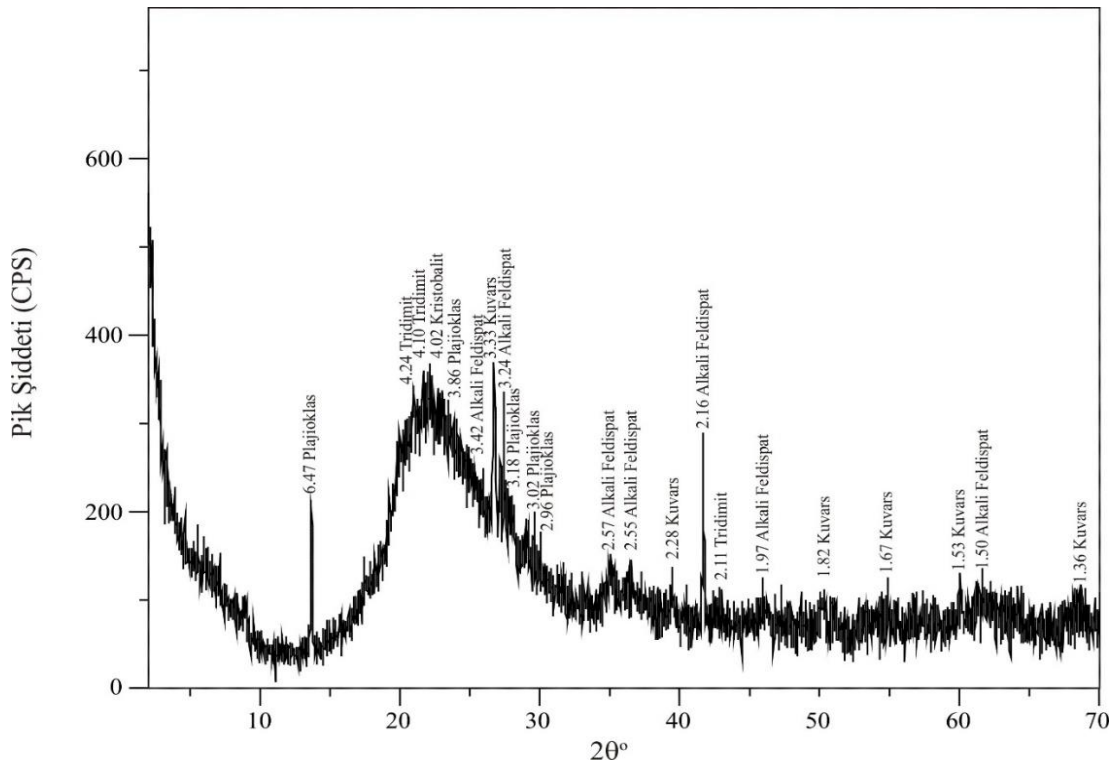
Resim 4.6 KD4 diyatomit numunesine ait SEM görüntüsü.

4.1.2 X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

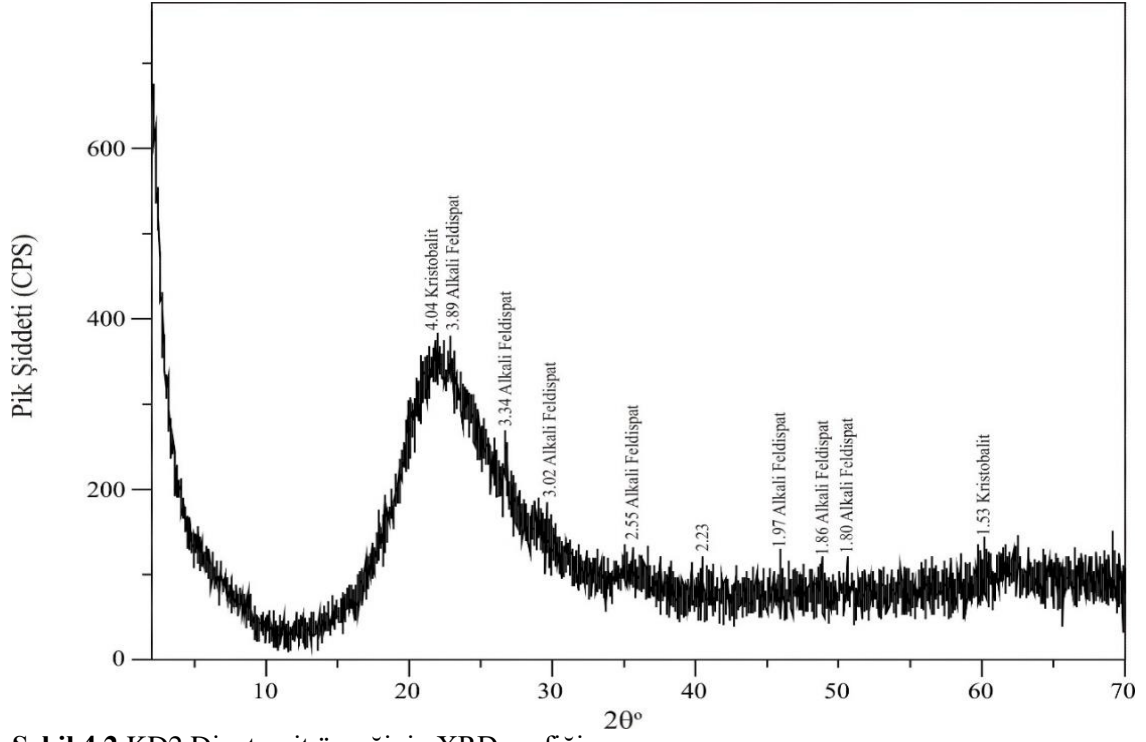
Diyatomit örneklerinin mineralojik bileşimi X-ışınları difraktometresi (XRD) analiz yardımıyla incelenmiştir. Analiz sonuçları diyatomit örneklerinin büyük oranda amorf fazdan oluştuğunu (Çizelge 4.1), aynı zamanda örneklerdeki en önemli silis minerallerinin tridimit, kristobalit ve kuvarsdır oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca örneklerin belli oranlarda pliajioklas ve alkali feldispat minerallerini de içerdiği belirlenmiştir. KD1, KD2, KD3 ve KD4 diyatomit numunelerine ait XRD bulguları sırasıyla Şekil 4.1, 4.2, 4.3, ve 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Diyatomit örneklerinin XRD yönteminde belirlenmiş amorf faz oranları.

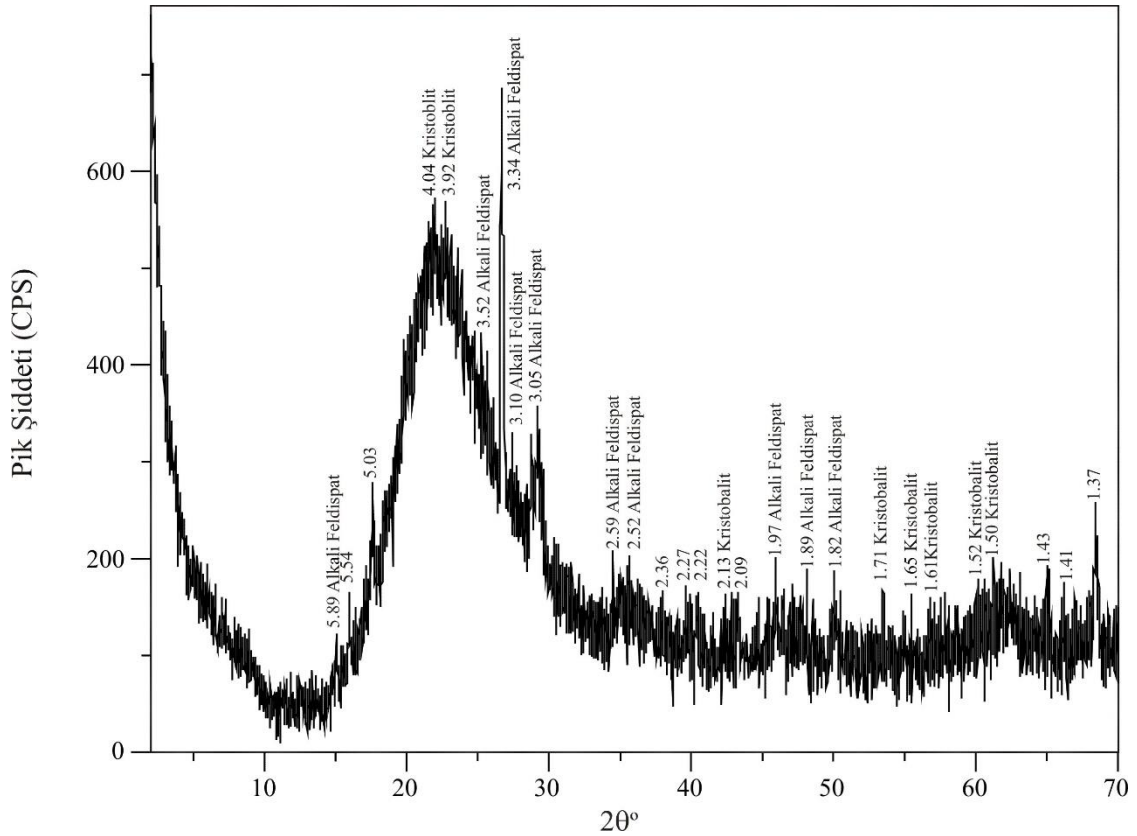
Örnekler	KD1	KD2	KD3	KD4
Amorf Faz Oranı (%)	74,4	87,6	87,2	68,9



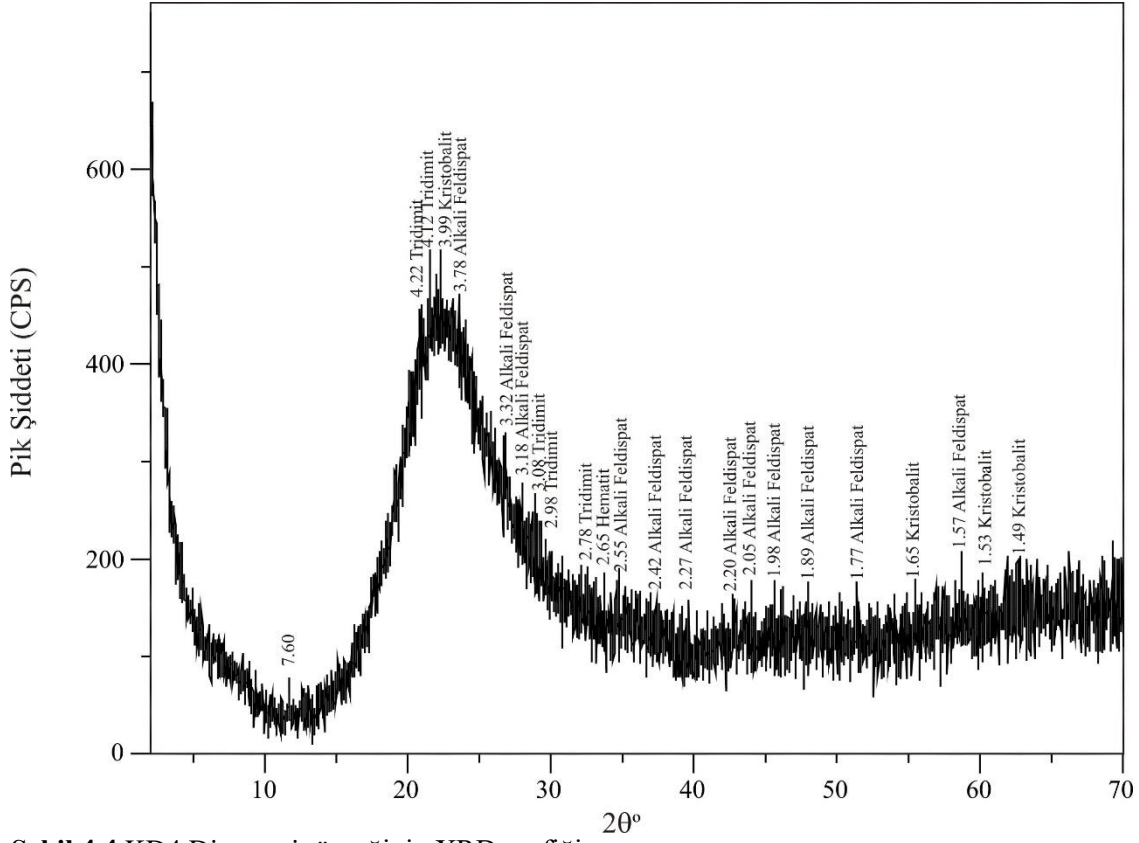
Şekil 4.1 KD1 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.



Şekil 4.2 KD2 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.



Şekil 4.3 KD3 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.



Şekil 4.4 KD4 Diyatomit örneğinin XRD grafiği.

4.1.3 X-Işını Floresans (XRF) İncelemeleri

Çalışmada kullanılan diyatomit örnekleri kimyasal analizleri AKÜ DAL Laboratuvarında X-ışını floresans spektrometresi (XRF) yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Diyatomitin kimyasal bileşimindeki en önemli bileşen olan SiO₂ olup, bu bileşen diyatomitin endüstriyel kullanımında belirleyici özelliكتedir (Yıldız, 1997). Çalışmada kullanılan örneklerde SiO₂ %82,56 ile 89.49 arasında değişmektedir. Örneklerin XRF yönteminde belirlenen amorf faz oranıyla SiO₂ arasında ilişki incelendiğinde, SiO₂ miktarının amorf faz oranıyla doğru orantılı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu ilişki diyatomitlerdeki SiO₂ içeriğinin büyük bir bölümünün amorf silisten kaynaklandığını göstermektedir.

Çizelge 4.2 Ham diyatomitin kimyasal analiz sonucu.

Örnek	KD1	KD2	KD3	KD4
SiO ₂	82,5622	89,1322	84,7938	89,4925
Al ₂ O ₃	4,4401	1,7034	2,7672	1,5625
Fe ₂ O ₃	2,4676	1,1003	2,2881	0,3658
MgO	0,6082	0,2057	0,4406	0,2343
CaO	1,0631	0,6316	1,0559	0,7214
Na ₂ O	0,2441	0,1795	0,2744	0,1898
K ₂ O	0,8225	0,2978	0,6331	0,2366
TiO ₂	0,1631	0,1895	0,1343	0,085
P ₂ O ₅	0,0411	0,0498	0,0505	0,0161
Cr ₂ O ₃	TE	TE	0,0187	0,0152
Rb ₂ O	0,0146	TE	0,0203	TE
As ₂ O ₃	0,0193	TE	0,0207	TE
GeO ₂	TE	0,0162	TE	TE
ZrO ₂	TE	0,060	TE	TE
MnO	0,0979		0,0212	
SrO	0,0258	0,0188	0,0261	0,0138
NiO	0,0051	TE	TE	TE
BaO	0,1292	TE	0,0934	TE
SO ₃	0,593	0,2556	1,078	0,206
Cl	0,0161	TE	0,0186	0,044
Ateş Kaybı	6,663	6,2072	6,2541	6,8
Toplam	99,97	99,99	99,99	99,98

SiO₂ içeriği, diyatomitden yararlanma bakımından en önemli bileşenlerden birisidir. Bal peteği silika yapısı diyatomite yüksek absortivite, kimyasal stabilite ve düşük hacim özgül ağırlık gibi yararlı özellikler verir.

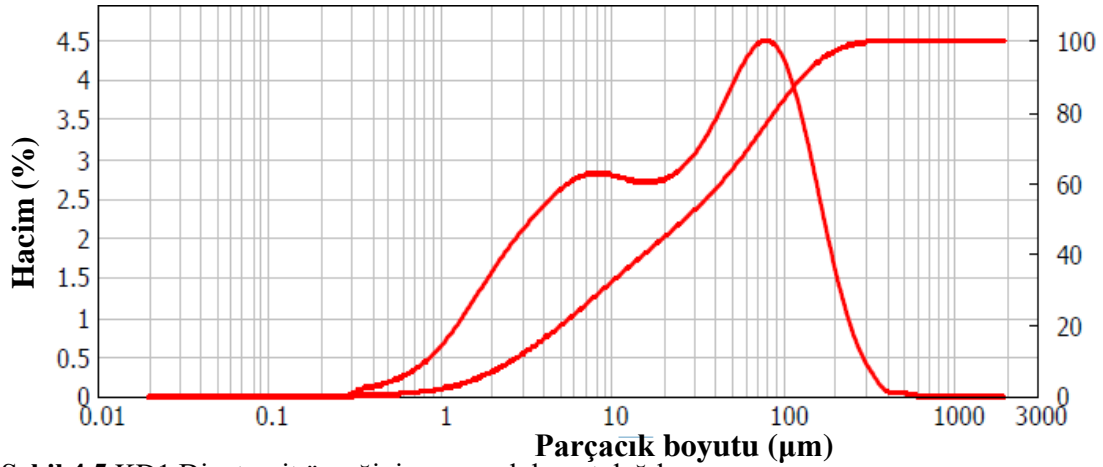
b4.1.4 Tane Boyutu Analizi

KD1, KD2, KD3 ve KD4 diyatomit örnekleri için tane boyutu analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.7’de görüleceği gibi KD3 tane boyutunun diğer numunelere göre daha küçük dane boyutları içerdiği görülmektedir. Nitekim KD3 diyatomit numunesinin özgül ağırlık değerinin diğerlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Buna paralel olarak KD3 modifiye bitüm numunesinin de özgül ağırlık değerleri diğer numunelere göre yüksek elde edilmiştir. KD1, KD2 ve KD4 numunelerinin özgül ağırlık değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Diyatomit örneklerin tane boyut dağılımını gösteren d(0.1), d(0.5), d(0.9)

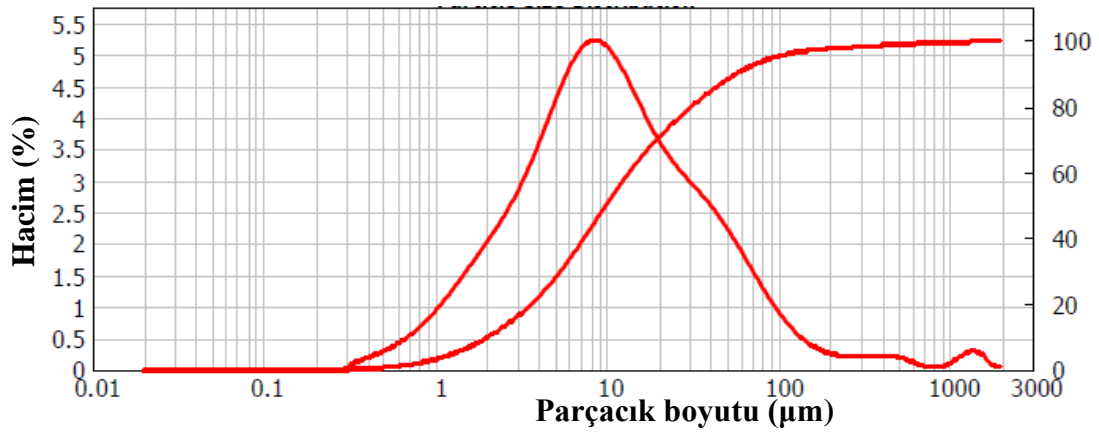
değerleri incelendiğinde KD2, KD4 diyatomit örneklerinin diğer örneklere göre ince olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3 Diyatomit örneklerin tane boyut analiz sonuçları.

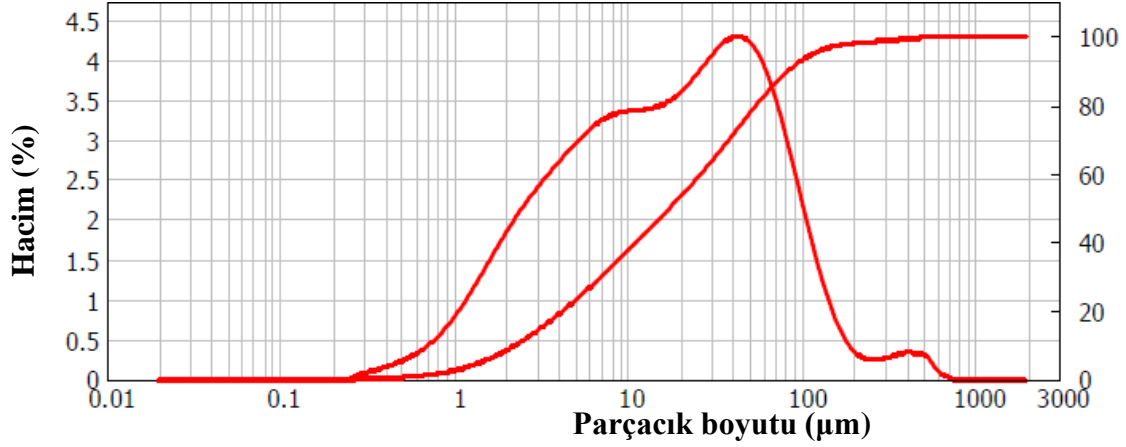
Bileşen	KD1	KD2	KD3	KD4
d(0.1)	2,46	2,10	2,25	2,17
d(0.5)	29	10,18	16	14
d(0.9)	140	50,14	80	100



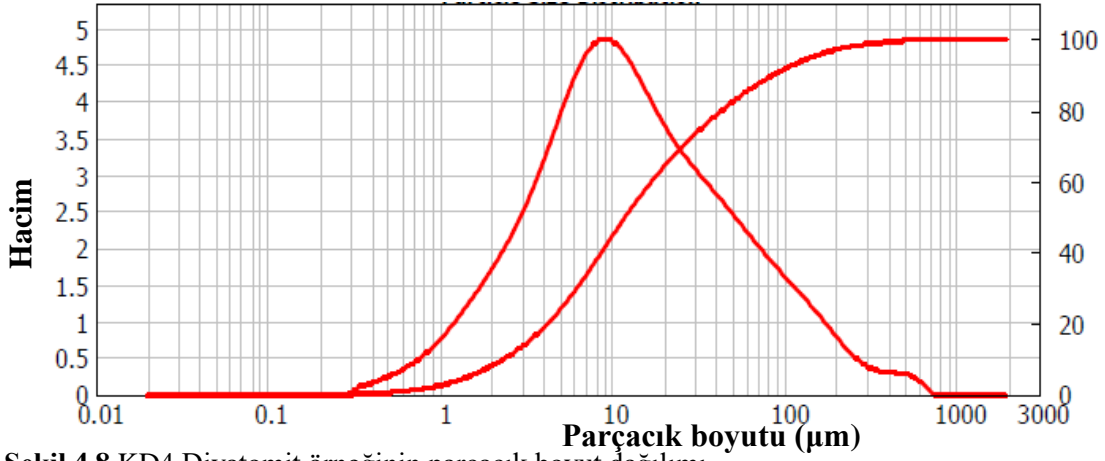
Şekil 4.5 KD1 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.



Şekil 4.6 KD2 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.



Şekil 4.7 KD3 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.

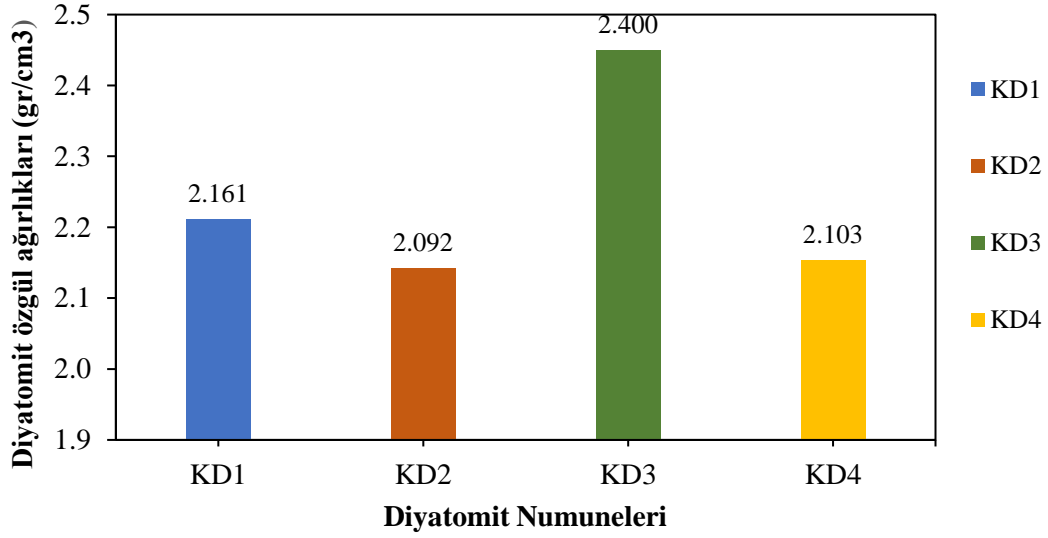


Şekil 4.8 KD4 Diyatomit örneğinin parçacık boyut dağılımı.

4.1.5 Özgül Ağırlık Deneyi

Farklı kademelerden alınan diyatomit örneklerinde gerçek özgül ağırlık değerleri gaz piknometre yöntemiyle bulunmuş, ve elde edilen sonuçlar Şeki 4.9'de verilmiştir.

Örneklerin özgül ağırlık değerleri genellikle birbirine yakın olmakla birlikte KD3 nolu örneğin özgül ağırlığı diğerlerine nazaran biraz daha yüksektir. Diyatomitlerde özgül ağırlığı etkileyen en önemli faktör kayacın yapısındaki inorganik bileşenler olup, bunların kayacın içindeki oranları özgül ağırlığı artırmaktadır.

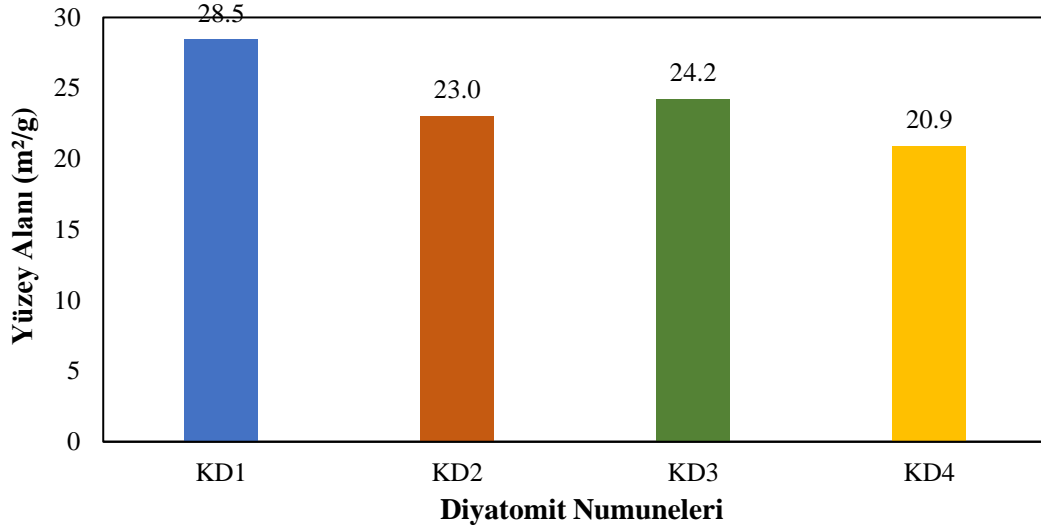


Şekil 4.9 Diyatomit numunelerinin gerçek özgül ağırlık değerleri.

Elde edilen sonuçlara göre KD2 numunesinin gözeneklilik yüzdesinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Gözenekliliğin yüksek oluşu daha pürüzlü bir tane yüzey yapısının da bir göstergesi olabilir.

4.1.6 Yüzey Alanı ve Gözenek Boyut Dağılımı Analizi

Farklı kademelerden alınan diyatomit örneklerinde BET (Yüzey Alanı) analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'de verilmiştir. Örneklerin toplam gözenek alanları ise 20.9 ile 28.5 m²/gr arasında değişmektedir . Cong vd. (2012)) tarafından yapılan çalışmada da diyatomit numunelerinin BET yüzey alanlarının çalışma örneklerimizdeki değerlere benzer olarak 22,13 m²/g olarak rapor edilmiştir.



Şekil 4.10 Diyatomitlerin toplam gözenek alanları (m²/gr).

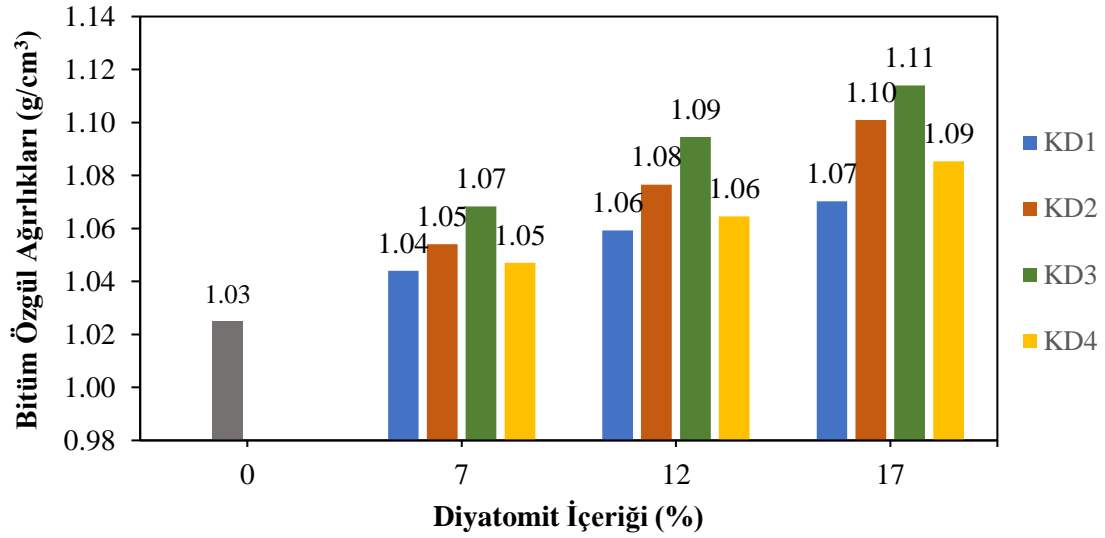
4.2 Modifiye Bitüm Deney Sonuçları

İscehisar Seydiler bölgesindeki ocaktan dört farklı serviyeden alınan diyatomit numuneleri ile (KD1, KD2, KD3 ve KD4), üç farklı oranda (%7, 12 ve 17) modifiye edilen bitüm numuneleri üzerinde özgül ağırlık, penetrasyonu, yumuşama noktası, dönel viskozite, dönen ince film halinde yaşlanma (RTFO), dinamik kesme reometre (DSR) deneyi, Vialit Yapışma ve Nicholson soyulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Penetrasyon indeksi (PI), 135 ve 165 °C'deki kesme hassasiyetleri, viskozite-sıcaklık hassasiyeti, 135 ve 165 °C'deki modifikasyon indisi ve Penetrasyon-Viskozite numarası hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıdaki bölümlerde ilgili başlıklar altında verilmiştir.

4.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

Bitüm numuneleri için özgül ağırlık deney sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. Diyatomit özgül ağırlığı belirgin şekilde en yüksek olan KD3 numunesiyle üretilen modifiye bitümlerin özgül ağırlık değerleri de 1,11 gr/cm³ olarak en yüksek değer elde edilmiştir.

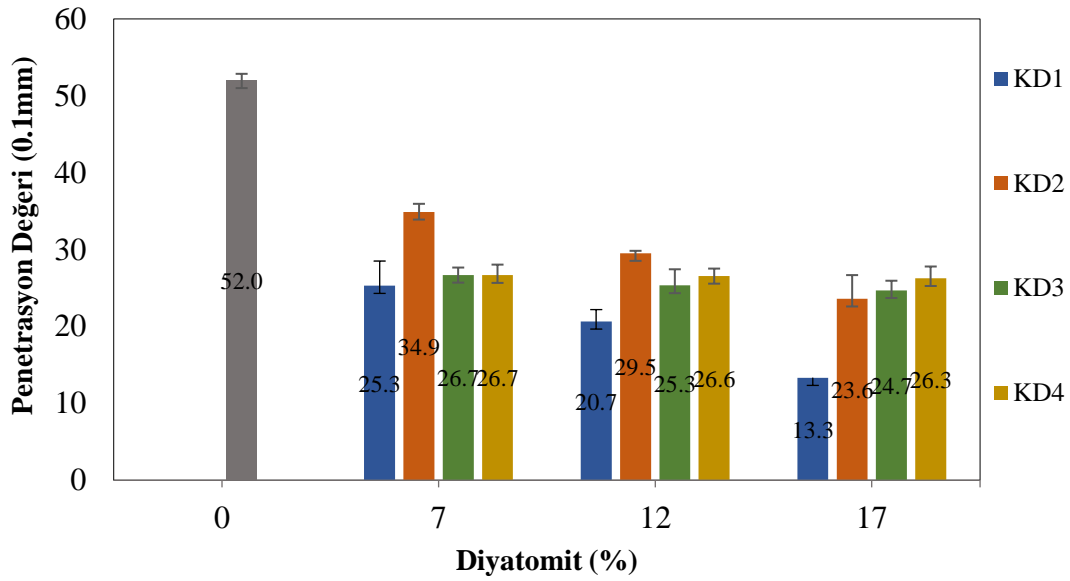
Tüm numunelerde diyatomit modifikatör miktarının artmasıyla modifiye bitüm özgül ağırlık değerlerinde de düzenli bir artış görülmüştür.



Şekil 4.11 Diyatomid ile modifiye edilmiş bitümlerin özgül ağırlık değeri değişimleri

4.2.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Farklı tabakalardan alınan KD1, KD2, KD3 ve KD4 diyatomit numuneleriyle farklı oranlarda modifiye edilen B50/70 bitüm numuneleri üzerinde penetrasyonu deneyi yapılmış ve diyatomit katkısı ile bitüm kıvamında meydana gelen değişiklikler belirlenmiştir. Buna göre numunelerin 25 °C'deki penetrasyon değeri değişimleri şahit bitüm numunesiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12'de görülmektedir.

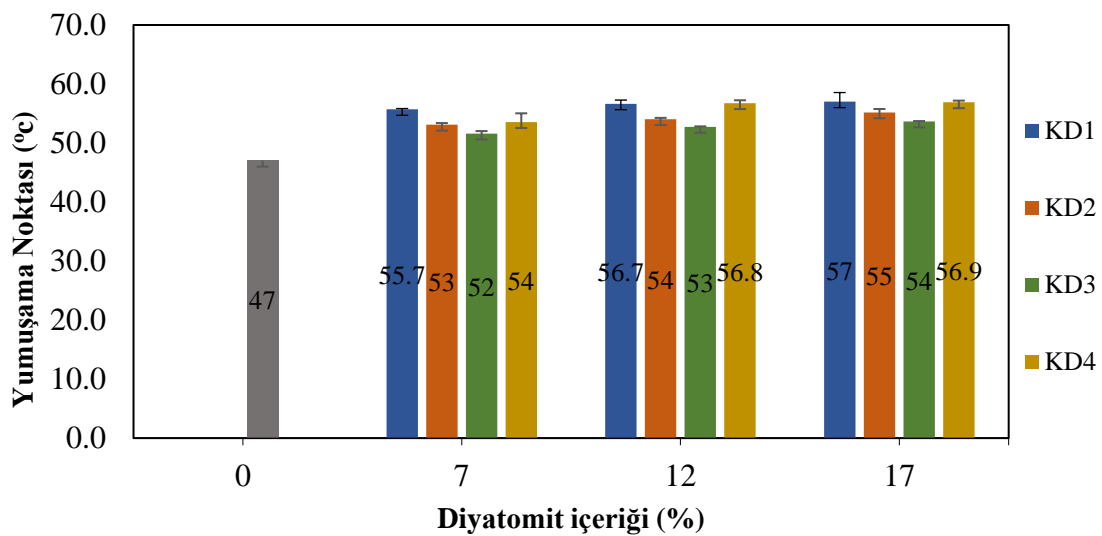


Şekil 4.12 Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin 25 °C’deki penetrasyon değeri değişimleri.

Diyatomitle modifiye edilen tüm bitüm numunelerinde, şahit bitüm numunesine göre penetrasyon değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Ağırlıkça %7 oranında diyatomit kullanıldığında azalma $KD1 < KD3 = KD4 < KD2$ şeklinde elde edilmiştir. Diyatomit miktarı %12’ye çıkarıldığında penetrasyon değerlerindeki azalmalar $KD1 < KD3 < KD4 < KD2$ olarak gerçekleşmiştir. Diyatomit miktarı en yüksek olan %17’ye yükseltildiğinde ise penetrasyonu değerindeki azalmalar $KD1 < KD2 < KD3 < KD4$ şeklinde elde edilmiştir. Diyatomit miktarı artışı ile KD1, KD2 ve KD4 numunelerinde kararlı bir azalma görülmüştür. En yüksek azalma değeri KD1 numunesinde, en düşük azalma değeri ise KD4 numunesinde elde edilmiştir. Benzer şekil de Çubuk (1998) ve Yi-qui (2012), Zhang vd. (2012), Huang (2019)’da diyatomit kullanımıyla penetrasyon değerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Çubuk %5 ila 20 arasında değişen oranlarda diyatomit katkısını kullanmış ve penetrasyonu değeri 48 mm^{-1} değerine düşmüştür. Zhang vd.’de %0, 9, 11, 13, 15 ve 17 oranlarında diyatomit kullanmışlar ve penetrasyonu değerleri %17 diyatomit katkısında 62 mm^{-1} olarak bulmuşlardır. Seydiler diyatomiti ile yapılan çalışmada ise $13,3 \text{ mm}^{-1}$ değerine kadar düşüş görülmüştür. Dolayısıyla diyatomit kaynak farklılığına göre bitüm davranışının da değişebileceği düşünülmektedir.

4.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

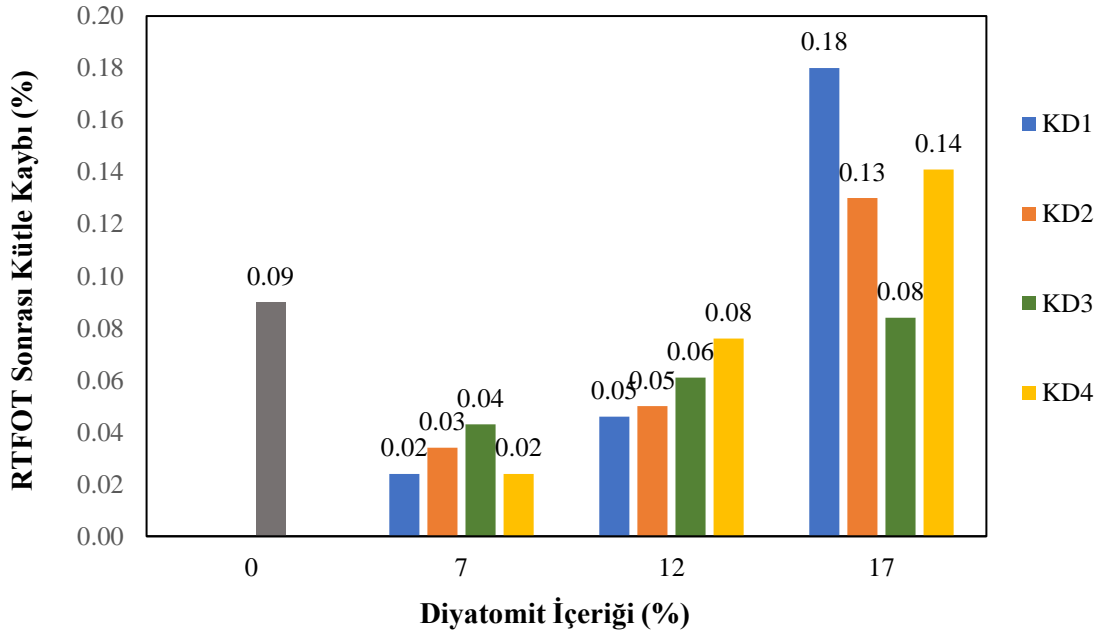
Bitümlü bağlayıcılarda kıvamla ilgili önemli bir deney de yumuşama noktası deneyidir. Dört farklı tabakadan alınan diyatomid örnekleri ile 3 farklı oranda modifiye edilen bitüm numunelerinin tamamında yumuşama noktasının yükseldiği yani modifiye bitüm numunelerinin sıcaklığa karşı duyarlılıklarının şahit numuneye göre azaldığı görülmüştür. Modifiye bitüm numunelerinin yumuşama noktası değişimleri Şekil 4.13’de görülmektedir. Diyatomit katkısı %7 oranında kullanıldığında KD1, KD2, KD3 ve KD4 numunelerinde yumuşama noktası artış oranları sırasıyla %15,6; %12,7; %10,6 ve %14,9 olarak elde edilmiştir. Diyatomit katkısı %12 oranında kullanıldığında KD1, KD2, KD3 ve KD4 numunelerinde yumuşama noktası azalma oranları sırasıyla %20,6; %14,9; %12,8 ve %20,9 olarak bulunmuştur. Diyatomit katkısı %17 oranında kullanıldığında ise KD1, KD2, KD3 ve KD4 numunelerindeki yumuşama noktası azalma oranları sırasıyla %21,3; %17,0; %14,9 ve %21,1 olarak elde edilmiştir. Zhang vd. (2012) ve Huang vd. (2019)’nin belirttiği gibi, genel olarak diyatomit katkı miktarı artışıyla tüm numunelerde yumuşama noktasının da artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Yumuşama noktasındaki artış büyükten küçüğe doğru KD1>KD4>KD2>KD3 olarak elde edilmiştir. En yüksek artışında KD1’de görülmesi diyatomitlerin toplam gözenek alanlarıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.13 Diyatomid ile modifiye edilmiş bitümlerin yumuşama noktası değişimleri.

4.2.4 Dönen İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları

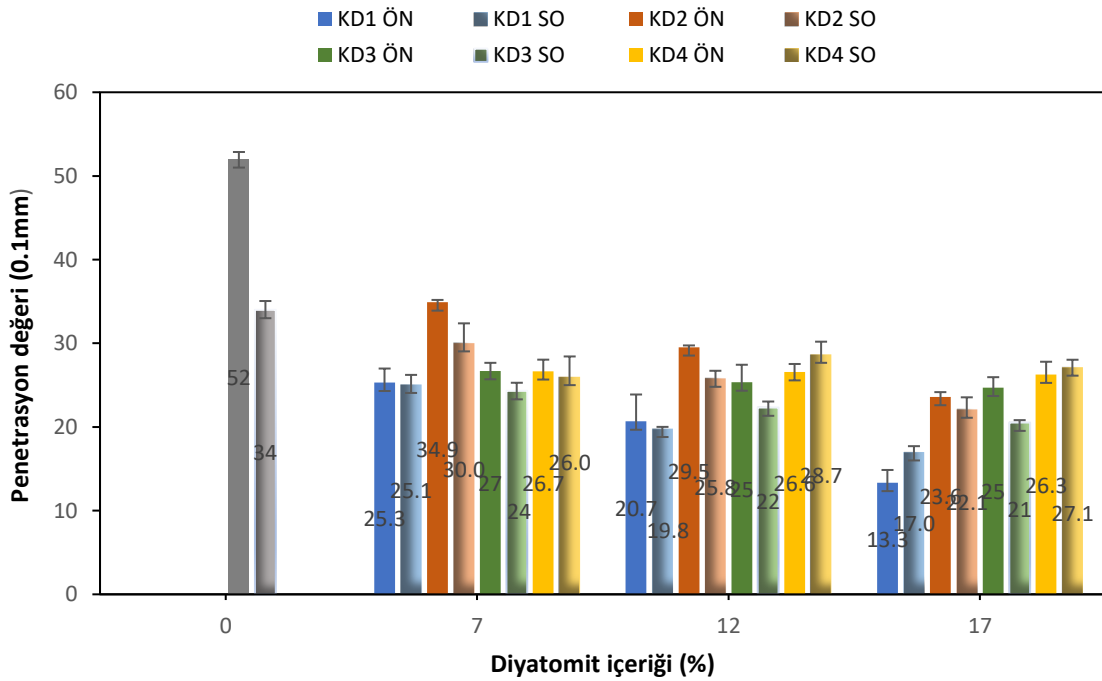
Dönen ince film halinde ısıtma deneyi sonucunda bitüm numunelerinde meydana gelen kütle kayıpları ölçülerek kısa dönem yaşlanma etkisi değerlendirilmiştir. Bitüm numunelerindeki kütle kaybı değerlerinin diyatomit içeriğine göre değişimleri Şekil 4.14’de görülmektedir.



Şekil 4.14 Diyatomitlerin Kütle Kaybı.

RTFOT sonrası penetrasyon değerlerindeki azalmalar Şekil 4.15’de görülmektedir. Diyatomit içeriğinin artışıyla, genel olarak, penetrasyon değerlerinin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre diyatomit kullanım içeriği arttıkça yaşlanmanın etkisinin azaldığı düşünülmektedir. Çünkü diyatomit içeriğinin artışıyla penetrasyonu değerinde etkili bir azalma hiçbir numunede görülmemiştir. Yaşlanma sonrası penetrasyonu değerindeki en yüksek azalma %65,4 oranla şahit numunede görülmüştür. Diğer modifiye numuneler incelendiğinde KD1, KD2 ve KD3’de beklendiği gibi RTFOT sonrası penetrasyon değerlerinde azalma görülürken, KD4 numunelerinde ise %7 diyatomit oranında herhangi bir değişim görülmemiş, %12 ve 17 oranlarında ise

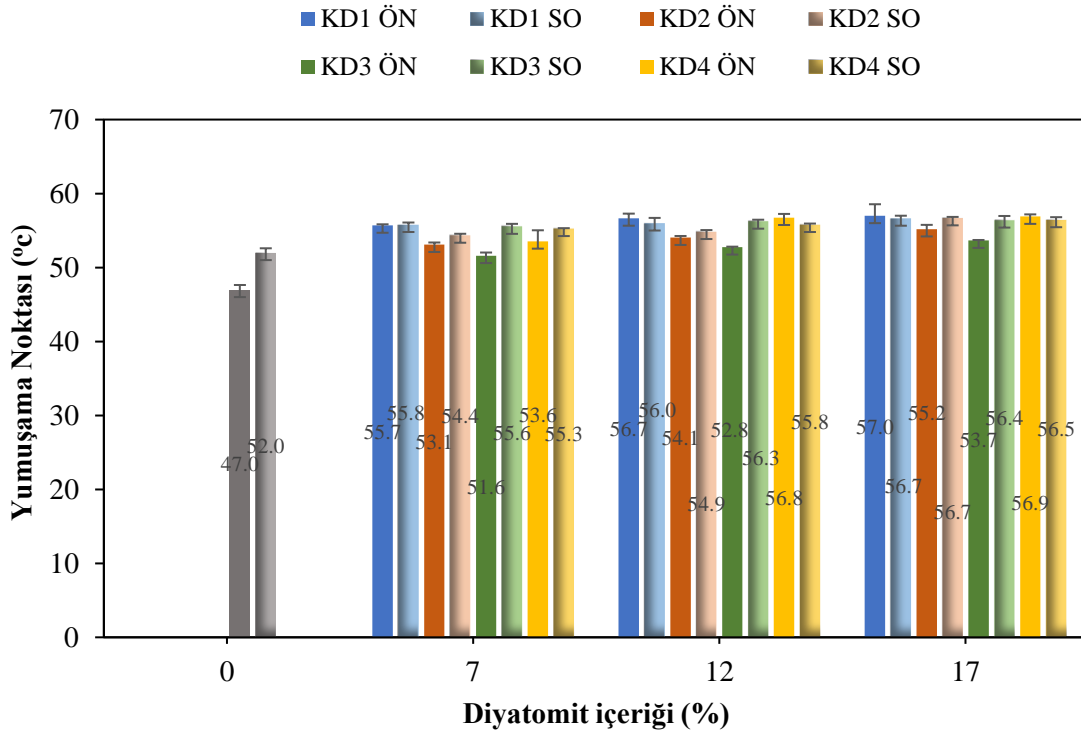
RTFOT sonrası penetrasyon değerlerinde artış görülmüştür. Bunun nedeninin KD4 örneğinin diğer örneklere göre nispeten düşük toplam gözenek alanına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm bunlara ilaveten sadece %17 diyatomit katkılı KD1 numunesinde penetrasyon değerinde artış kaydedilmesi toplam gözenek alanının penetrasyon değerlerindeki etkisinin göstergesidir. Diyatomit içeriğinin KD1 numunelerindeki değişimiyle, RTFOT sonrası penetrasyon sonuçlarında çok kararlı bir değişim göstermemiştir.



Şekil 4.15 RTFOT deneyi sonrası penetrasyon değerlerindeki azalmalar.

RTFOT sonrası yumuşama noktası değerlerindeki artışlar Şekil 4.16'de görülmektedir. Tüm numune serilerinde diyatomit içeriğinin artışıyla yumuşama noktası değerlerinde artış eğilimi olduğu kaydedilmiştir. RTFOT sonrası şahit numunenin yumuşama noktası 5 °C artış gösterirken, diyatomit katkılı numunelerdeki en yüksek yumuşama noktası artışı 4 °C olarak KD3 numunesinde görülmüştür. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyi sonuçları da diyatomit ile modifiye edilmiş numunelerin yaşlanmalarının şahit numuneye göre daha sınırlı kaldığını göstermektedir. RTFOT sonrası penetrasyon deneyi sonuçlarıyla da uyumlu olarak KD1 numunesi %7 diyatomit oranında neredeyse ihmal edilebilecek bir artış olmuş, bununla birlikte %12 ve 17 oranlarında ise yumuşama

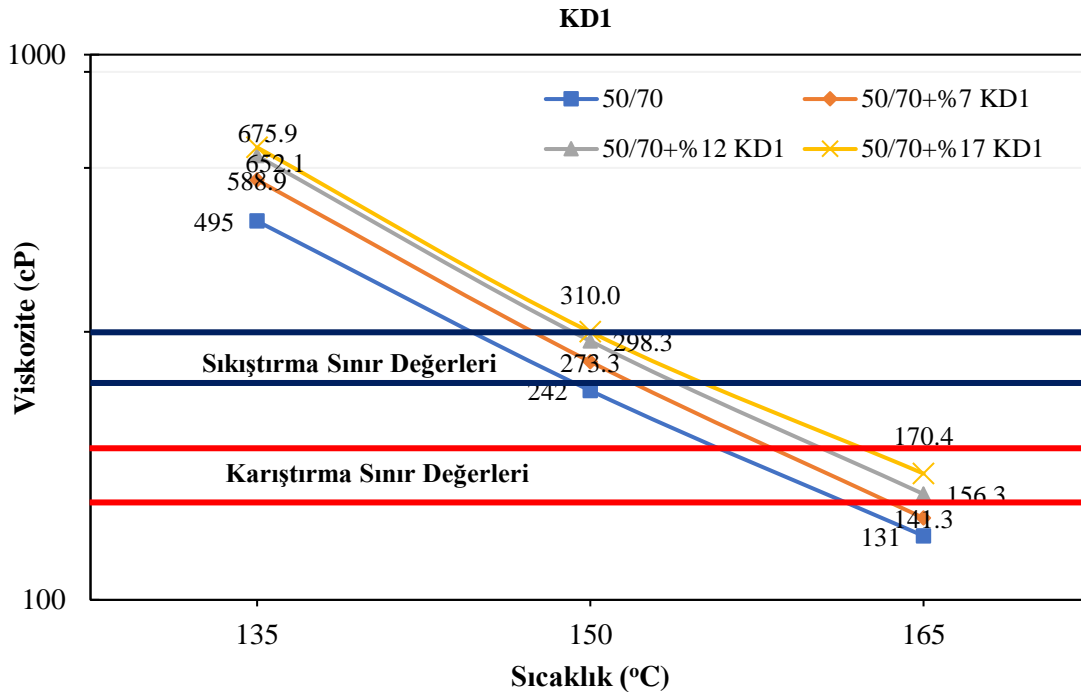
noktalarında sınırlı bir azalma görülmüştür. KD1 sonuçları RTFOT sonrası penetrasyon deneyi sonuçlarıyla da uyumludur. KD2 ve KD3 numunelerinde ise tüm diyatomit içeriklerinde RTFOT sonrası yumuşama noktalarında artış meydana gelmiştir. Fakat bu artış oranın şahit numuneye göre oldukça düşüktür. KD2 numunesinde %7, 12 ve 17 diyatomit oranlarındaki yumuşama noktası artışları sırasıyla 1,3; 0,8 ve 1,5 °C'dir. KD 3 numunesinde %7, 12 ve 17 diyatomit oranlarındaki yumuşama noktası artışları ise sırasıyla 4,0; 3,5 ve 2,7 °C 'dir. KD4 numunesinde ise %7 diyatomit oranında yumuşama noktası 1,7 °C artarken, %12 ve 17 oranlarında ise yumuşama noktası değerlerinin sırasıyla 1,0 ve 0,3 °C azaldığı kaydedilmiştir. Tüm bu sonuçlar genel olarak bitüm içerisine katılan diyatomit katkısının bitümün kısa dönem yaşlanma eğilimini önemli ölçüde yavaşlattığını göstermektedir. Aynı zaman da deney bulguları, farklı kademelerden alınan diyatomit katkılarının da değişik oranlarda farklı etkiler yaptığını da ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.16 RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktasındaki artışlar.

4.2.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi Sonuçları

Diyatomitle modifiye edilmiş bitüm numunelerinin akışkanlık özelliklerini aynı zamanda sıcaklığa bağlı olarak reolojik özelliklerinde meydana gelen değişimleri belirlemek için dönel viskozimetre deneyi yapılmıştır. Viskozite ölçümleri 135, 150 ve 165 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Prowell ve Brown 2007). American Society for Testing and Materials (ASTM), asfalt karışımının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını hesaplamak için özel bir standart yayınlamıştır (ASTM D2493 2009). Bu yöntem ASTM eşdeğerlik yöntemi olarak bilinir. Bu standarda göre viskozite ölçümü belirtilen sıcaklıklarda 135 °C ve 165 °C'de yapılmalı ve elde edilen viskozite değerleri logaritma ölçeğinde sıcaklığa göre çizilmiştir. Deney sonuçlarına göre diyatomitli modifiye edilmiş KD1, KD2, KD3 ve KD4 bitümlerin şahit bitüm numunesi ile karşılaştırmalı viskozite değişimleri sırasıyla Şekil 4.17, 18, 19 ve 20'de görülmektedir.

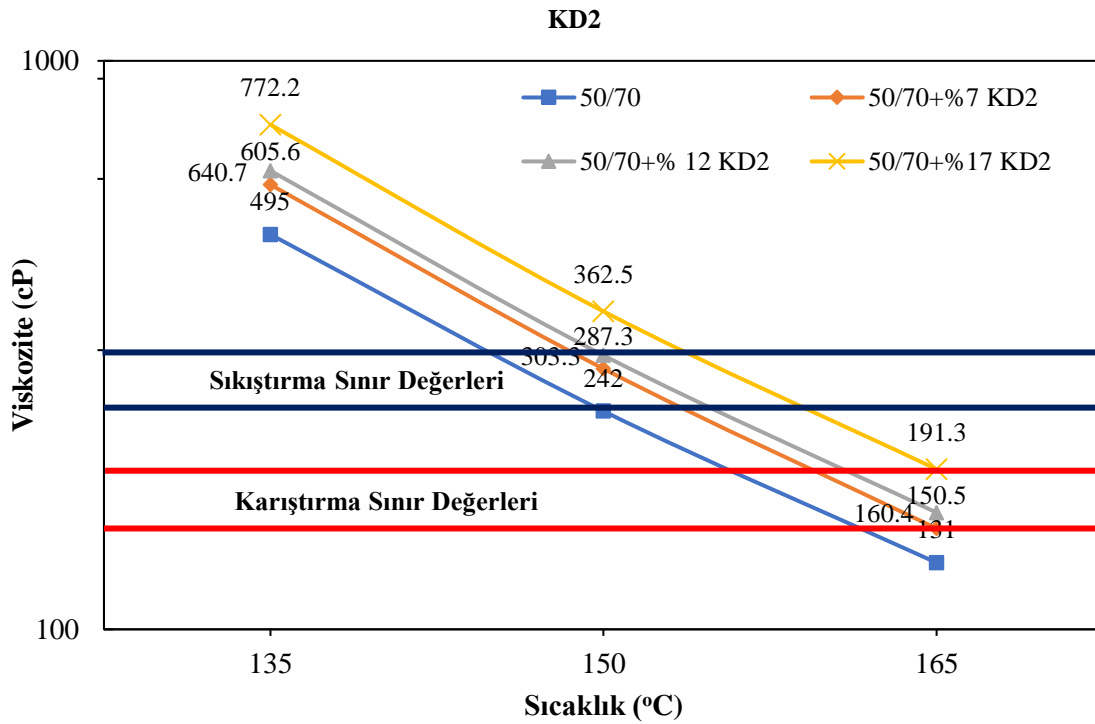


Şekil 4.17 KD1 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.

KD1 numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları değişimleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çizelge 4.3’ten de görüleceği üzere, diyatomit katkı miktarı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.4 KD1 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

Diyatomit Katkı Yüzdesi (%)	Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)
0	156,4 – 162,0	145,0 – 149,8
7	158,6 – 164,0	147,9 – 152,4
12	161,0 – 165,0	149,7 – 154,4
17	162,8 – 168,2	150,5 – 155,7

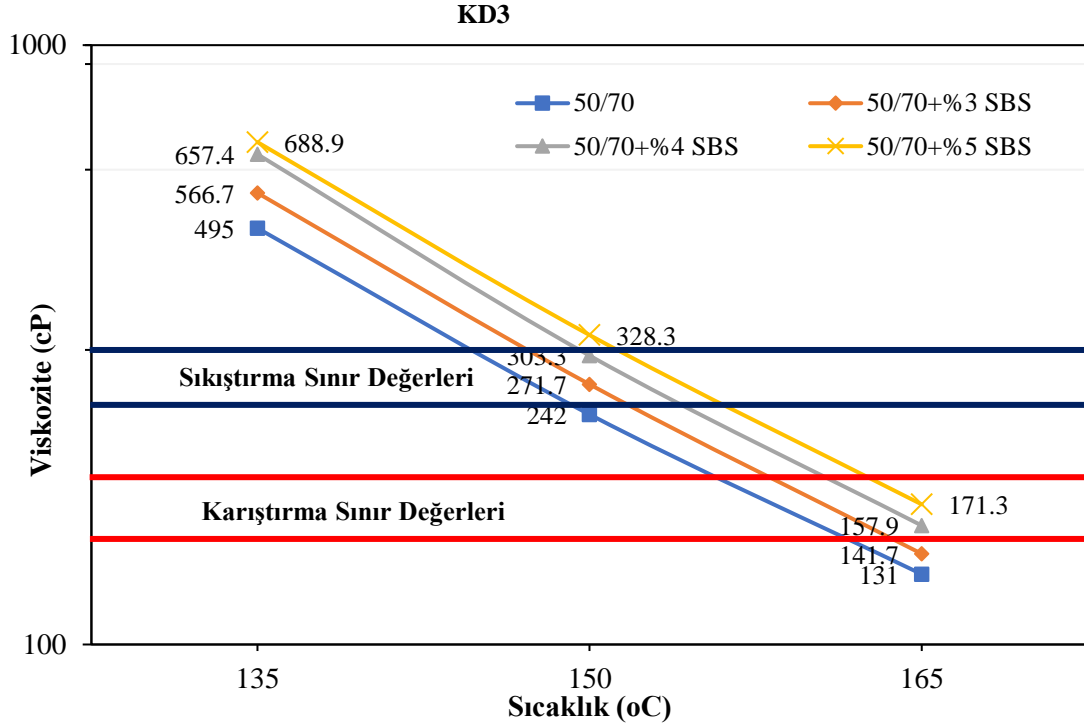


Şekil 4.18 KD2 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.

KD2 numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları değişimleri Çizelge 4.4’de görülmektedir. Çizelge 4.4’ten de anlaşılacağı gibi, diyatomit katkı miktarı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı gözlenmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık limitleri sırasıyla 0.17 ± 0.02 Pa.s ve 0.28 ± 0.03 Pa.s’dir (ASTM D2493 2001).

Çizelge 4.5 KD2 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

Diyatomit Katkı Yüzdesi (%)	Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)
0	156,4 – 162,0	145,0 – 149,8
7	159,5– 165,8	148,5 – 153,8
12	161,0 – 166,0	149,7 – 154,5
17	165,0 – 168,0	153,2 – 158,0

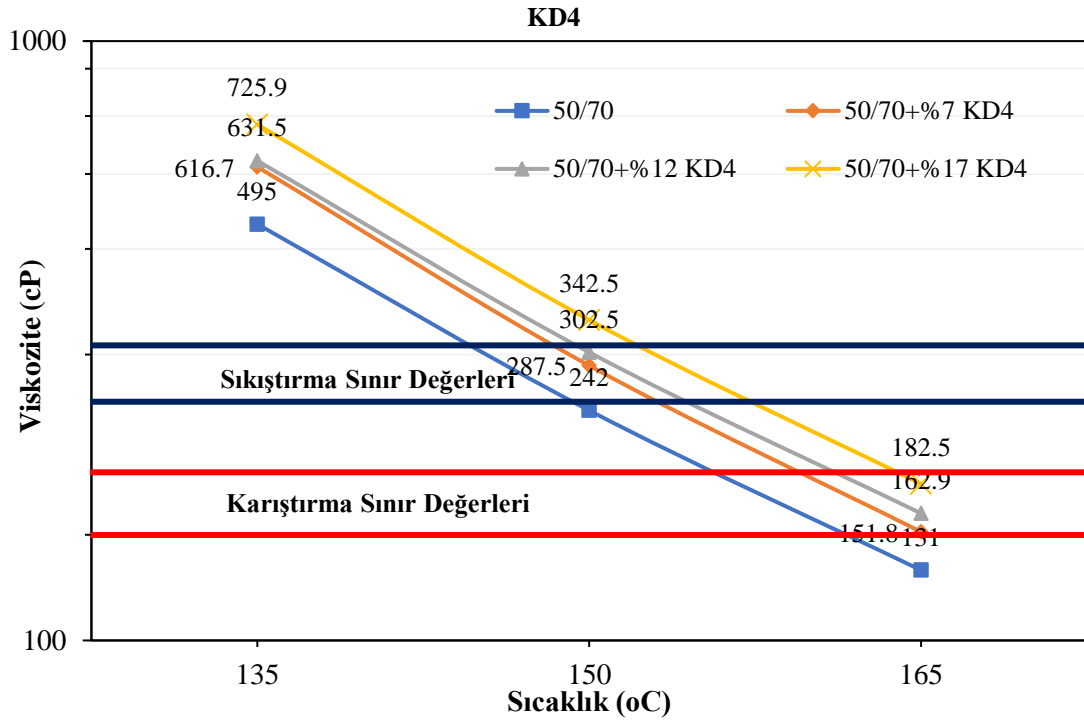


Şekil 4.19 KD3 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.

KD3 numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları değişimleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.5’ten de görüleceği üzere, diyatomit katkı miktarı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.6 KD3 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

Diyatomit Katkı Yüzdesi (%)	Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)
0	156,4 – 162,0	145,0 – 149,8
7	158,3– 163,7	147,1 – 151,9
12	160,7 – 165,9	149,5 – 154,0
17	162,7 – 167,7	151,2 – 156,0



Şekil 4.20 KD4 Modifiye bitüm numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını ASTM (eşdeğerlik) yöntemine göre gösteren sıcaklık viskozite grafiği.

KD4 numunesi için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları değişimleri Çizelge 4.6'de görülmektedir.. Çizelge 4.6'ten de anlaşılacağı gibi, diyatomit katkı miktarı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.7 KD4 Modifiye bitüm numunesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

<i>Diyatomit Katkı Yüzdesi (%)</i>	<i>Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)</i>	<i>Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)</i>
0	156,4 – 162,0	145,0 – 149,8
7	159,6 – 165,7	148,4 – 153,0
12	161,0 – 166,4	149,5 – 154,4
17	164,0 – 168,6	152,3 – 157,4

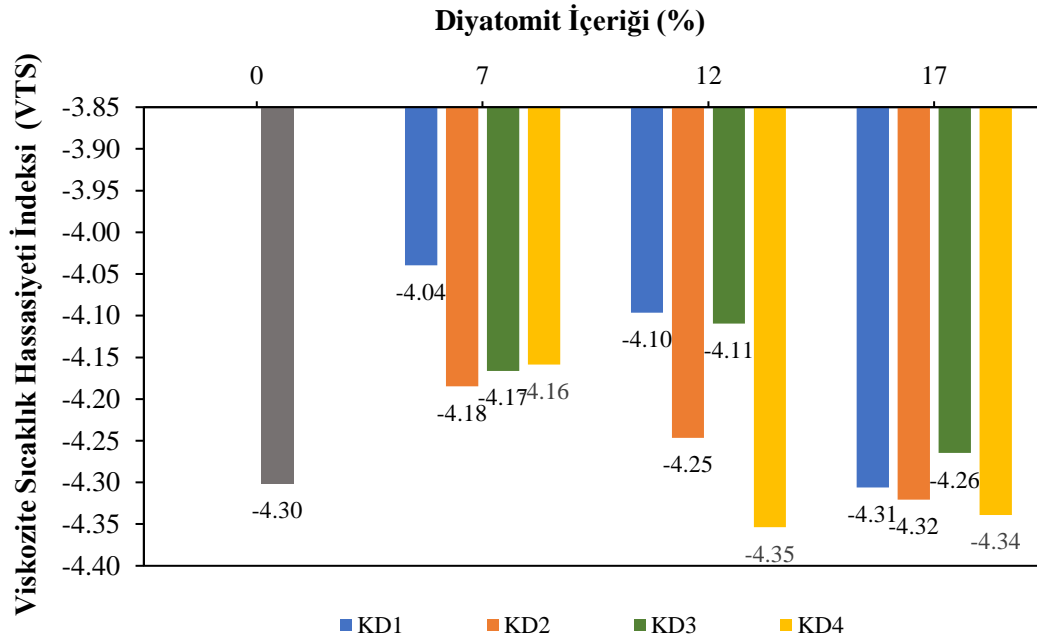
Genel olarak diyatomit katkısının tüm numunelerde bitüm viskozitesini yükselttiği dolayısıyla karıştırma sıkıştırma sıcaklıklarının her ikisinin de yükseldiği görülmüştür. Ayrıca tüm serilerde (KD1, KD2, KD3 ve KD4) diyatomit kullanım miktarı yükseldiğinde, viskozite değerleri de yükselmiştir. Benzer şekilde Cong vd.(2010) ve Wei vd. (2016), Cheng vd. (2017), Huang vd. (2019)'de diyatomit katkı miktarı arttığında

viskozitenin de attığını rapor etmişlerdir. Yine Cong vd.'nin (2012) belirttiği gibi genel olarak %7 ve %12 diyatomit oranlarında viskozite artış eğilimi daha belirgin olmuştur.

Viskozite deneyi sonuçlarına göre bazı indeks hesaplamaları da yapılmıştır. Özellikle modifiye bitümlerin sıcaklık hassasiyetlerinin belirlenmesinde Viskozite Sıcaklık Duyarlılığı (VTS) İndeksi kullanılmaktadır (Griffith and Puzinauskas 1963; Roberts vd. 1996; Puzinauskas 1967, Rasmussen vd. 2002). VTS'nin büyüklüğü, bağlayıcının sıcaklık duyarlılığı ile doğru orantılıdır (Rasmussen vd. 2002). VTS indeksi değeri (4.1) eşitliğiyle hesaplanır:

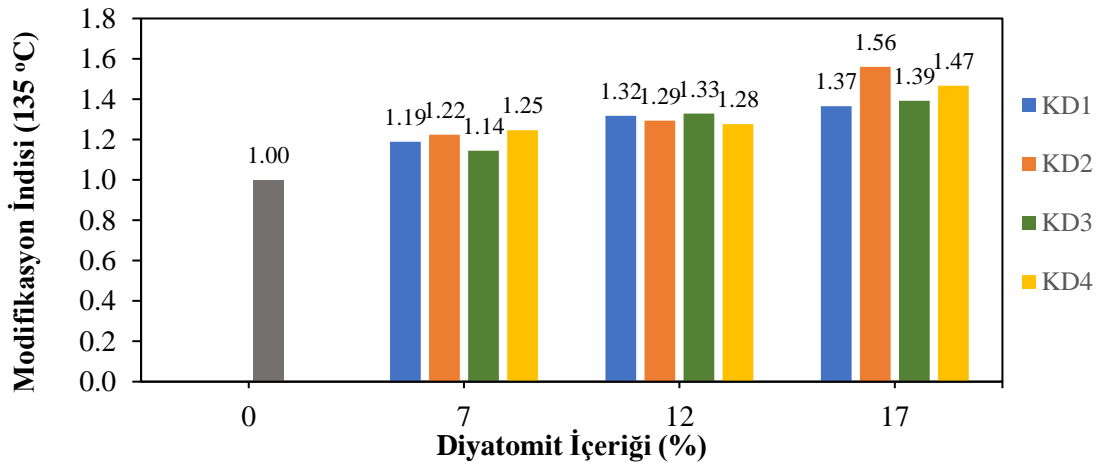
$$VTS = \frac{\log[\log(\eta T_2)] - \log[\log(\eta T_1)]}{\log(T_2) - \log(T_1)} \quad (4.1)$$

Burada, T1 ve T2 bağlayıcının bilinen iki noktadaki sıcaklıkları, R Rankine derecesi ve ηT_1 , ηT_2 ise bağlayıcının bilinen iki noktadaki cP biriminden viskozite değerleridir. Diyatomit ile modifiye bitümlerin VTS değişimleri Şekil 4.21'de görülmektedir. Tipik bitümlü bağlayıcılar için bu değer -3,35 ile -3,84 arasında değiştiği rapor edilmiştir. Elde edilen değerlerin bu değere göre düşük olduğu görülmektedir. KD4 numunesinin %12 ve %17 diyatomit içeriklerinde ve KD2 %17 diyatomit içeriklerinde bu indeksin şahit bitüme göre daha düşük olduğu görülmüştür. Genel olarak numunelerin sıcaklık hassasiyetlerinin düşük olduğu diğer deney sonuçlarıyla da örtüşmektedir.

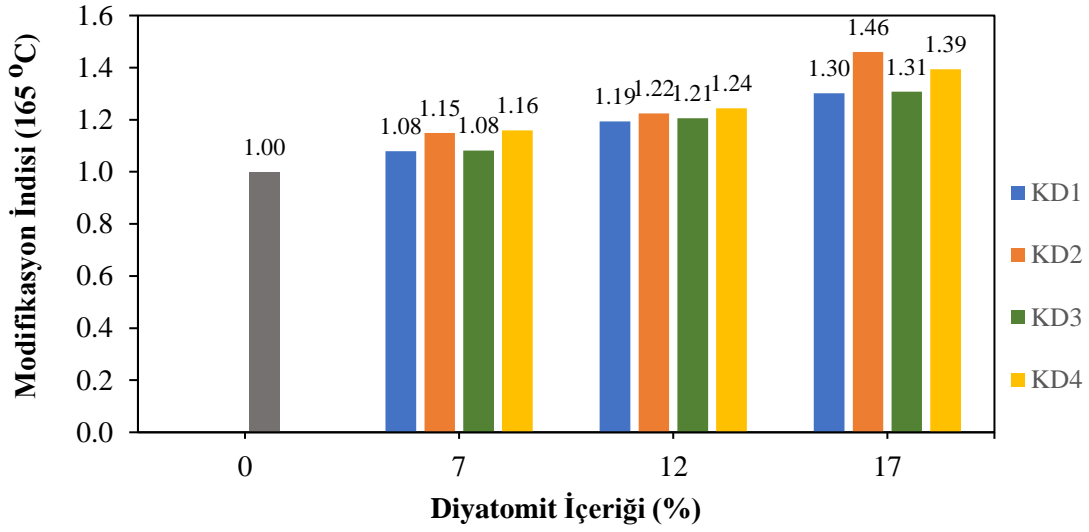


Şekil 4.21 Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin VTS indeksi değişimleri.

Modifikasyon indisi aynı sıcaklıkta (135 ve 165 °C) modifiye bitümün şahit bitüm viskozitesine oranıyla bulunan indistir. İndis değeri ne kadar yükselirse katkı maddesinin kıvam üzerinde o kadar etkin olduğu düşünülür (Gürer, 2014, Yılmaz M., Kök B.V. 2008). 135 ve 165 °C'deki modifikasyon indisleri değişimlerin sırasıyla Şekil 4.22 ve 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.22 135 °C'deki modifikasyon indisi değişimleri.

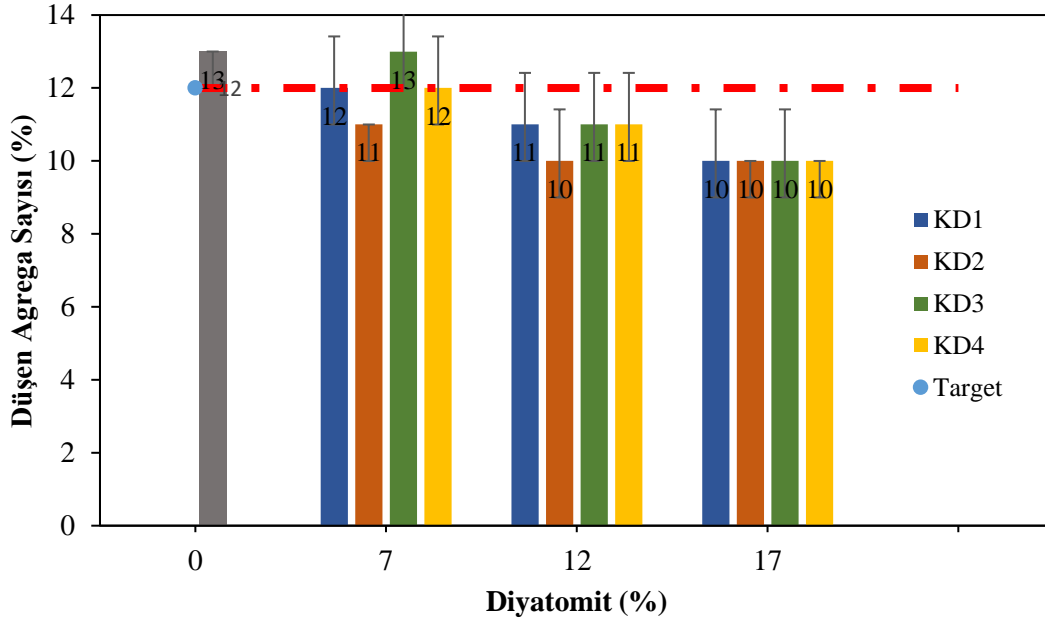


Şekil 4.23 165 °C'deki modifikasyon indisi değişimleri.

Şekil 4.22 ve 4.23'den de görülebileceği gibi ilave edilen diyatomit katkılarının tüm numunelerde kıvam da değişiklik yaptığı bununla birlikte en belirgin değişimlerin %17 oranlarında görülüşü belirlenmiştir. Diyatomitle modifikasyonun etkinliğinin KD2>KD4>KD3>KD1 şeklinde olduğu düşünülmektedir. Burada KD2 ve KD4'ün en saf diyatomit numuneleri olduğu dikkat çekmektedir.

4.2.6 Vialit Yapışma Deneyi Sonuçları

Vialit yapışma deneyi bitüm agrega adezyonunu belirlemek için yapılan bir deneydir. Diyatomit ile modifiye edilen numuneler üzerinde vialit yapışma deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.24'de verilmiştir.

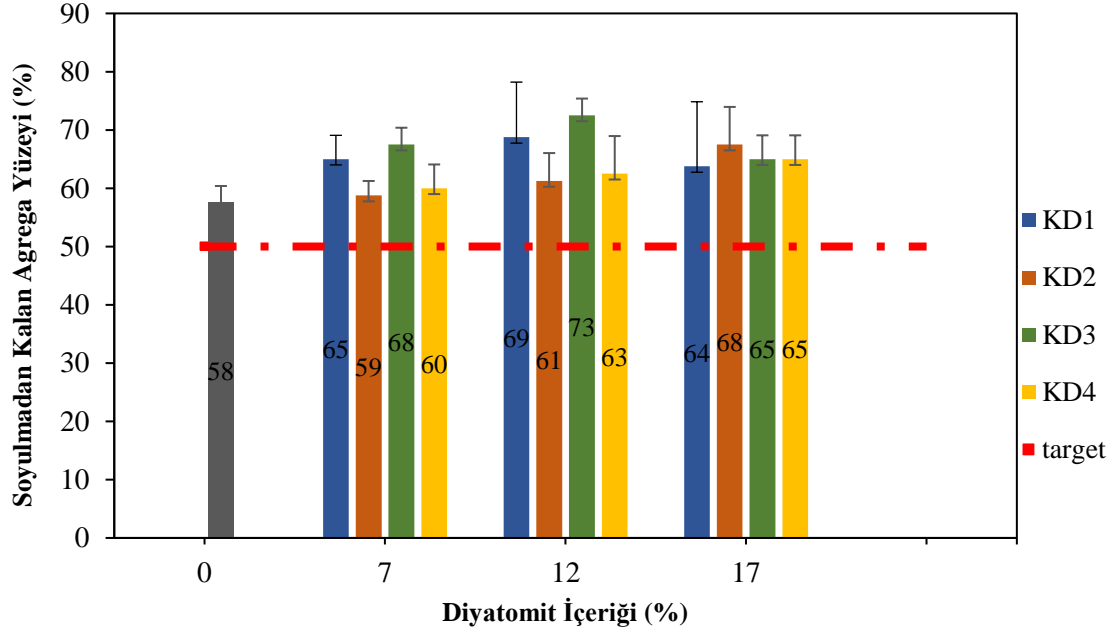


Şekil 4.24 Vialit yapışma deneyinde düşen agrega sayısı değişimleri.

Genel olarak, diyatomitle modifiye edilmiş numunelerin adezyon kabiliyetlerinin geliştiği, diyatomit katkı miktarı arttıkça düşen agrega sayısının azaldığı görülmüştür. %7 KD3 numunesi dışında, tüm numunelerde düşen agrega sayısının TCK şartnamesine (2013) göre değer olan 12'nin altında olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Yang vd. (2018)'de diyatomitin, yüksek SiO₂ içeriğine ve geniş özgül yüzey alanı ve gözenekli bir malzeme olduğundan dolayı bitüm emilimine katkıda bulunduğu ve bu nedenle diyatomitle modifiye edilmiş bitümlerin yapışma özelliklerinin iyileştiğini belirtmiştir.

4.2.7 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları.

Agrega numuneleri üzerindeki bitüm filmi su etkisiyle soyulabilmekte bu da bitümlü sıcak karışımlarda çeşitli bozulmalara neden olarak servis ömrünü azaltabilmektedir. Diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm numunelerinde Nicholson soyulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Nicholson deney sonuçlarına göre soyulmadan kalan agrega yüzeyi değişimleri Şekil 4.25'de görülmektedir.



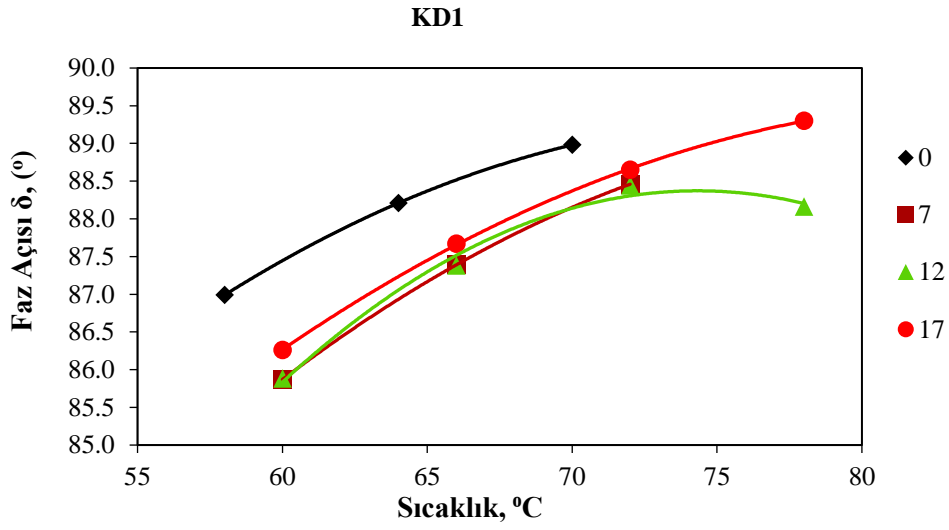
Şekil 4.25 Nicholson deney sonuçlarına göre soyulmadan kalan agrega yüzeyi değişimleri.

Deney sonuçlarına göre diyatomitle modifiye edilmiş bitüm numunelerinin soyulmaya karşı dirençlerinin şahit numuneye göre daha iyi olduğu görülmüştür. En yüksek soyulmadan kalan yüzey yüzdesinin KD3 numunesi olduğu belirlenmiştir. Tüm numunelerin soyulmadan kalan yüzey yüzdeleri TCK şartname (2013) minimum değeri olan %50'den daha büyüktür.

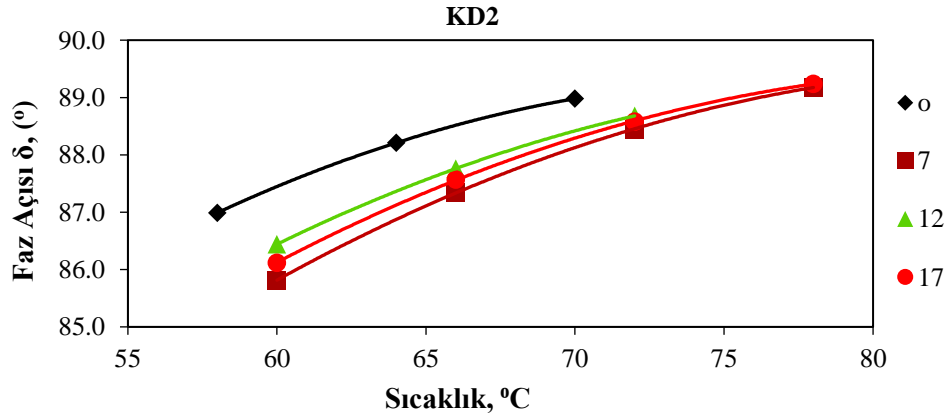
4.2.8 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

Dinamik kesme reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kesme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bitümlü bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Yılmaz ve Kök 2008, Gürer vd. 2020). Kompleks modülünün G^* büyüklüğü ve faz açısının (δ) derecesi bitümlü bağlayıcının sertliği ile deformasyon şekli (geri dönebilen ve geri dönemeyen) arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla gerekmektedir. Tekerlek izine

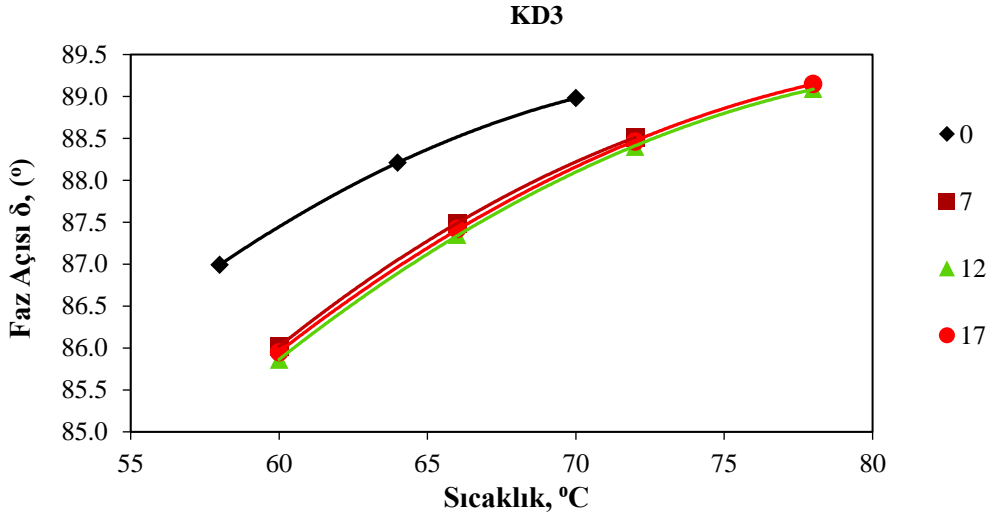
karşı dayanımının yüksek olması için G^* (Kompleks modülü) değerinin yüksek, faz açısının (δ) ise düşük olması gerekmektedir. Faz açısının düşük olması bitümlü karışımın esnek davranış sergileyeceğinin bir göstergesidir. Şahit, KD1, KD2, KD3 ve KD4 diyatomit modifiyeli bitüm numunelerinin farklı sıcaklıklardaki faz açıları değişimleri sırasıyla Şekil 4.26, 27, 28 ve 29’de verilmiştir.



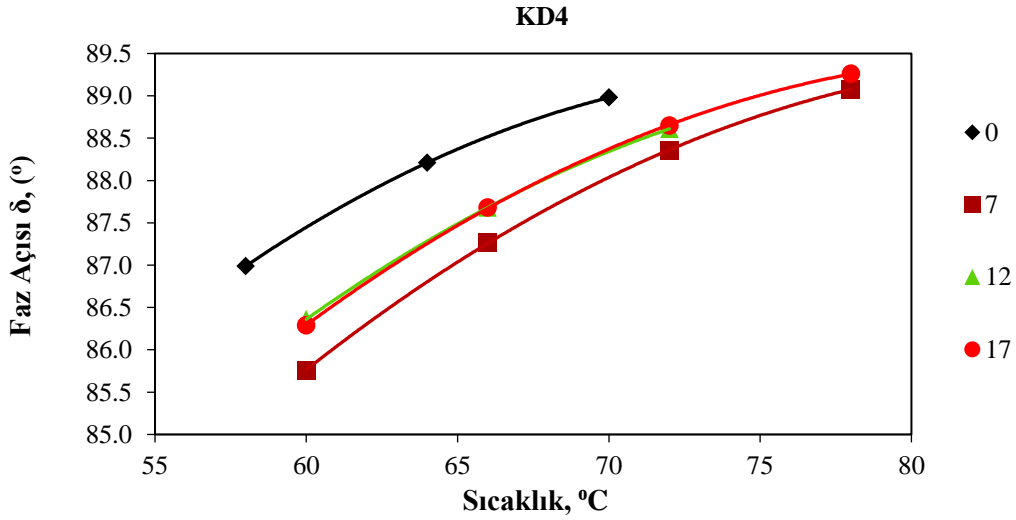
Şekil 4.26 KD1 diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.



Şekil 4.27 KD2 diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.



Şekil 4.28 KD3 diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.

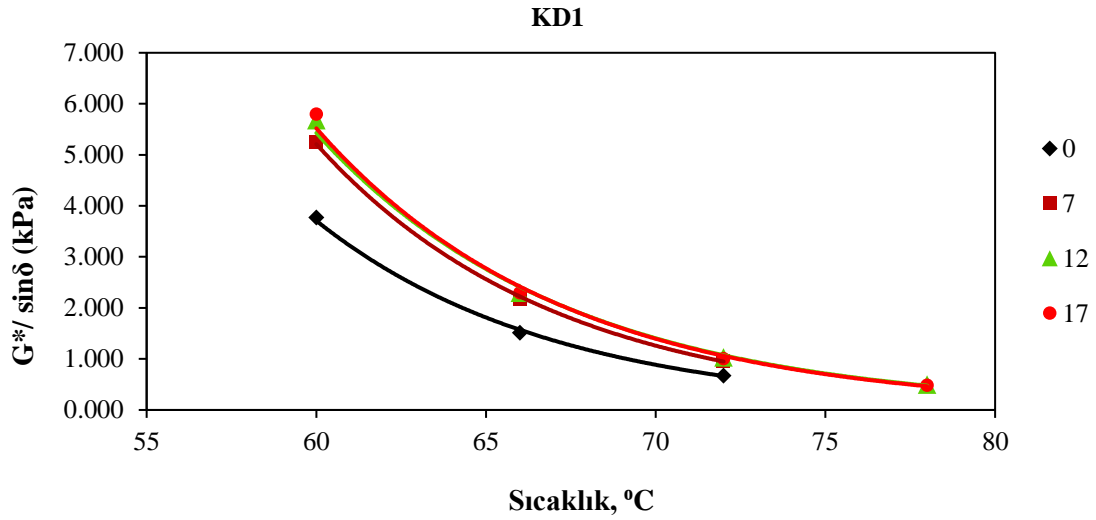


Şekil 4.29 KD4 diyatomit modifiyeli bitümlerin faz açılarının sıcaklıkla değişimleri.

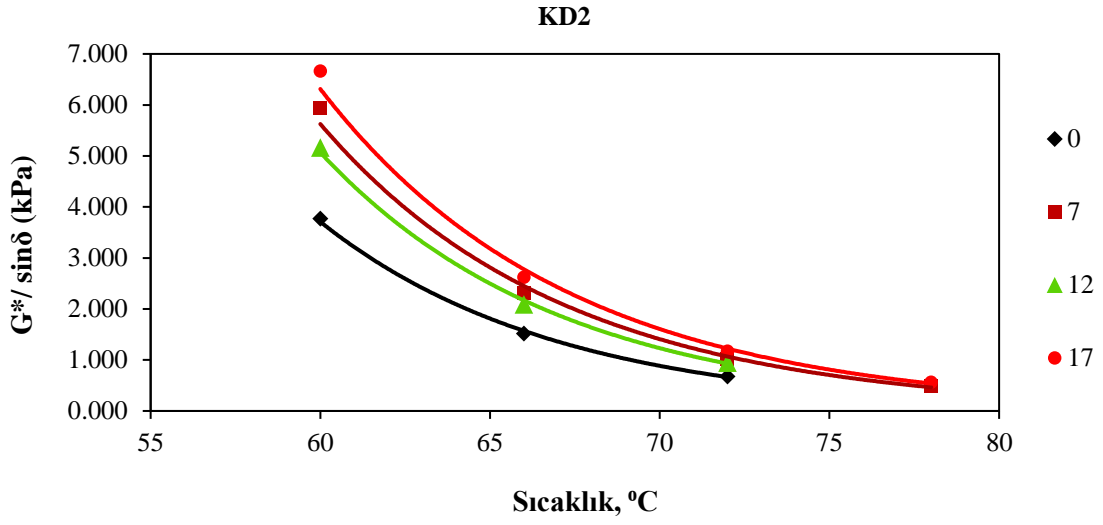
Şekil 4.26, 27, 28 ve 29'den de görülebileceği gibi diyatomit ile modifiye edilmiş tüm numunelerde faz açısının şahit numuneye göre en az 1° en fazla 1,5° azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde Cheng vd. 2017'de diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin faz açılarının düştüğünü belirtmişlerdir. Dolayısıyla diyatomit ile modifiye edilmiş bitüm numuneleri şahit bitüm numunesine göre daha esnek davranış sergileyecektir. KD1, KD2, KD3 ve KD4 serilerinde en düşük faz açıları, sırasıyla, %12, %7, %12 ve %7 diyatomit katkı yüzdelерinde elde edilmiştir. Optimum diyatomit kullanım oranlarının bu aralık

içerisinde olduğu düşünülmektedir. Nitekim Yang vd. (2018)'de benzer şekilde bitüm modifikasyonunda diyatomit katkısını %12 olarak kullanmışlardır. Zhang vd. (2012, Yue vd. (2019), Luo vd. (2016), Yi-qiu vd. (2012), %13, %12-14 oranlarda diyatomit kullanımını kaplama performansı için ideal bir değer olarak belirtmişlerdir, daha fazlasının kaplama performansının azalmasının neden olacağını belirtmişlerdir. Aynı zamanda, Yue vd. (2019) diyatomit ve lignin birleşimini bitüm modifikasyonunda kullanmışlardır. Bu araştırmacılar da optimum diyatomit kullanım aralığını %12-14 olarak belirlemişlerdir. %12-14 oranları bitüm deneyleri ve sertlik modülü ile tespit etmişlerdir. Faz açıları değişimlerinde kendi içerisinde en büyük farkların KD2 ve KD4 diyatomit örneklerinde olduğu görülmüştür. Literatürde SBS ile modifiye edilmiş bitümlere göre faz açıları karşılaştırıldığında ise bu düşme değerinin SBS maddesine göre daha sınırlı olduğu görülmüştür (Yılmaz ve Kök, 2008, Rafiqul vd. 2016).

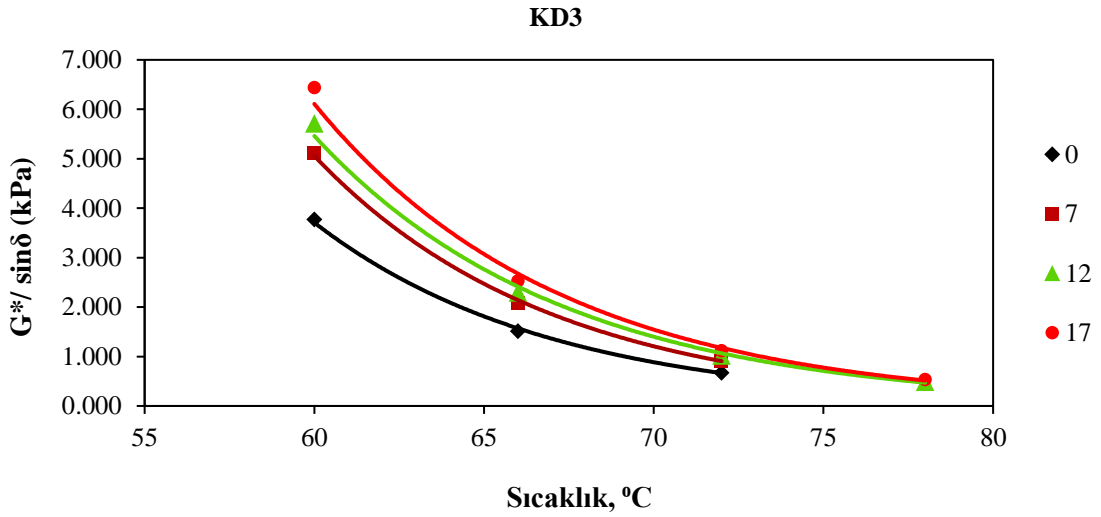
Diyatomitle modifiye edilmiş KD1, KD2, KD3 ve KD4 bitüm numunelerinin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri sırasıyla Şekil 4.30, 31, 32 ve 4.33'de verilmiştir.



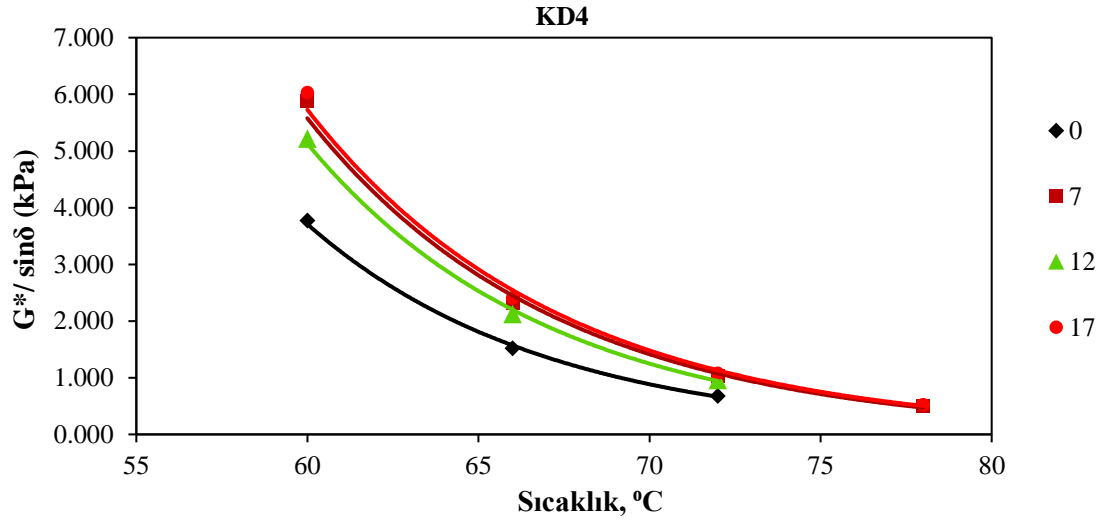
Şekil 4.30 KD1 diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.



Şekil 4.31 KD2 diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.



Şekil 4.32 KD3 diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.

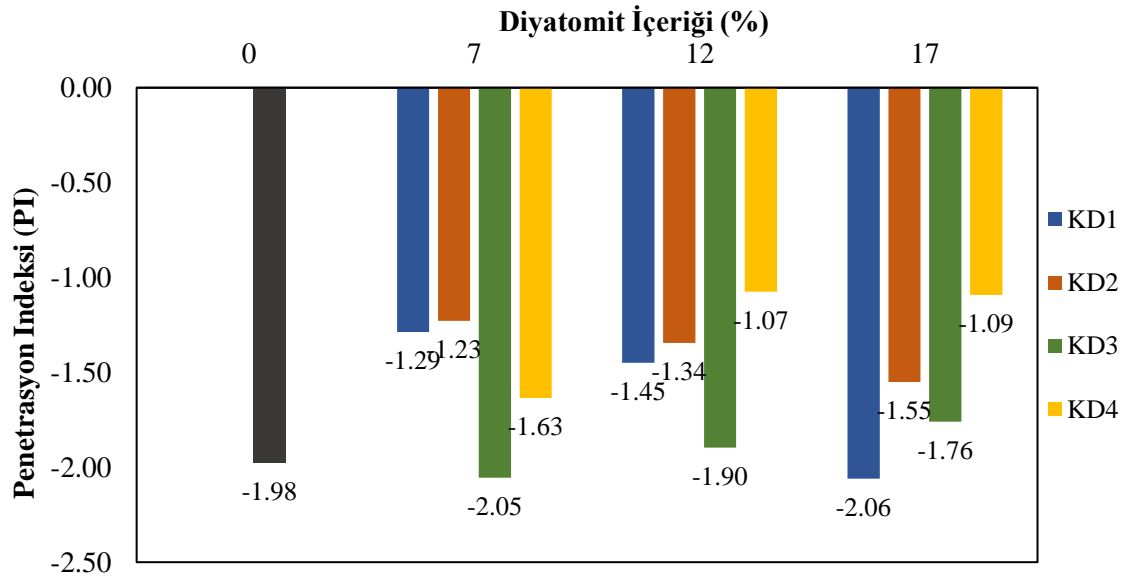


Şekil 4.33 KD4 diyatomit modifiyeli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametresi değişimleri.

Kompleks kesme modülünün G^* büyüklüğü ve faz açısının (δ) (delta) derecesi bitümlü bağlayıcının sertliği ile deformasyon şekli (geri dönebilen ve geri dönemeyen) arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla gerekmektedir. Bu değerlere özellikle yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izine karşı dayanım göz önünde bulundurulduğu zaman ihtiyaç duyulmaktadır. Tekerlek izine karşı dayanımın yüksek olması için G^* (Kompleks modül) değerinin yüksek, faz açısının (δ) ise düşük olması gerekmektedir (Gürer, 2014, Superpave). $G^*/\sin\delta$ parametresi tekerlek izine dayanım direnç faktörü olarak bilinir. Tekerlek izi oluşumuna karşın $G^*/\sin\delta$ parametresinin en az 1 kPa olması gerekmektedir (Yılmaz ve Kök 2008). Şekil 4.30, 31, 32 ve 4.33'den de görüldüğü gibi tüm numunelerde $G^*/\sin\delta$ parametresinin şahit numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da diyatomit ile modifiye edilmiş numunelerin tekerlek izi deformasyonuna dayanımlarının daha dirençli olacağını göstermektedir. Benzer şekilde Kietzman ve Rodier (1984), Kaşak (2007), Zhu vd.(2013), Cheng vd. (2017), Huang vd.(2019)'da diyatomit katkısının tekerlek izi deformasyon direncini geliştirdiğini belirtmişlerdir. Yalnızca 72 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, bazı numunelerde $G^*/\sin\delta$ parametresinin 1 kPa değerinin sınırında kaldığı görülmektedir. Numuneler içerisinde diyatomit kullanım yüzdelere göre $G^*/\sin\delta$ parametresi kıyaslandığında ise KD1 numunesinde %12 ve 17, KD2 numunesinde %17, KD3 numunesinde %12 ve 17 ve KD4 numunesinde ise %7 ve 17 numunelerinin en yüksek parametre değerlerini verdiği görülmüştür.

4.3 Penetrasyon İndeksi Hesaplamalarının Değerlendirilmesi

Penetrasyon indeksi değeri (PI) bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarını gösteren bir parametredir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon indeksi'nin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (Read J vd.2003, Gürer 2014). Diyatomit ile modifiye edilmiş numunelerin PI değerleri incelendiğinde genel olarak ısıya karşı duyarlı oldukları fakat diyatomit modifikasyonu ile bu duyarlılığın tüm numunelerde önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin penetrasyonu indeksi değişimleri Şekil 4.34'de görülmektedir.



Şekil 4.34 Penetrasyon indeksi değişimleri.

Sıcaklık duyarlılığındaki en büyük azalma $KD4 > KD2 > KD1 > KD3$ olarak elde edilmiştir. PI azalma yüzdeleri diyatomit içeriğine göre değişkenlik göstermiştir. %7 diyatomit oranında KD3 hariç tüm numunelerde PI değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma KD3 ve KD4 numunelerinde diyatomit kullanım oranı artışıyla devam ederken KD1 ve KD2 numunelerinde ise yükselme meydana gelmiştir. Genel olarak en yüksek kullanım oranında dahi KD1 hariç PI değerleri azalmıştır. Dolayısıyla diyatomit

katkısının bitüm sıcaklık duyarlılıklarını azalttığı söylenebilir. Benzer şekilde Yi-qiu vd. (2012)'de diyatomit kullanımıyla PI değerlerinin azaldığını rapor etmiştir.

4.4 Maliyet Analizi

Bu aşamada KGM/64-05/S-M 2021 pozuna göre 5 cm sıkışmış kalınlıkta Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ve diyatomit ile modifiye edilmiş bitümle 1 m² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş serttaş ve modifiye bitüm ile) için birim fiyat analizi yapılmış ve analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.8'te verilmiştir (İnt.Kyn. 4). SBS ve Diyatomit optimum kullanım oranı, literatür ve tez bulguları esas alınarak, sırasıyla, bitüm ağırlığının %3 ve %12'si olarak kabul edilmiştir (Korkmaz 2021). SBS için Çin kökenli ürün satış sitelerinin verileri esas alınmıştır. Normalde patentli SBS ürünlerinin daha pahalı birim fiyatları olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Çizelge 4.8 KGM/64-05/S-M 2021 pozuna göre modifiye bitüm ile 1 m² asfalt betonu aşınma tabakası yapılmasına ait birim fiyat analizi

Poz No	Tanım	Birimi	Optimum Miktarı (bitümün %3'ü)	Optimum Miktarı (Bitümün %12'si)	SBSli Asfalt Betonunun Birim Fiyatı (TL)	Diyatomitli Asfalt Bitim Fiyatı (TL)	PMB Asfalt Betonunun Tutarı (TL)	Diyatomit Asfalt Betonunun Tutarı (TL)
	Modifiye Edici Katkı Bedeli	kg	0,1875	0,7500	9,05	0,6	1,69	0,45
KGM6401-1	Asfalt Betonunun Aşınma Tabakasının Malzemelerinin Temini (Kırılmış ve Elenmiş Sert Taş ile) Tip 1	ton	0,1225	0,1225	50,12	50,12	6,14	6,14
KGM/4378	Beton ve Her nevi Asfalt Makinası ile Süpürme	DA	0,001	0,001	34,28	34,28	0,03	0,03
103.305.441	Katyonik Asfalt Emülsiyonu (CRS-1 Tipi)	kg	0,0002*1000		2,32	2,32	0,46	0,46
KGM/4398	Distribütör Makinası ile Yapıştırıcı Bitümlü Malzemenin Püskürtülmesi (Boru ile)	DA	0,001	0,001	75,33	75,33	0,08	0,08
KGM/4436/2	Büyük Plent Üni. PMB /Diyatomit Kullanılan "Asfalt Betonunun Kaplama" ve "Bitümlü Sıcak Temel Hazırlığı" için Gerekli İlave İşler	ton	0,1225	0,1225	8,69	7,21	1,06	0,88
KGM/4300/P MB	Özel Plentte Polimer Modifiye Bitüm /Diyatomitli Modifiye Bitüm Hazırlanması	ton	0,00637		232,68	193,12	1,48	1,23
KGM/4440/M	Büyük Plent Üni. İle Karışım Hazırlama Elektronik duargalı Finaşer ile Serme-Sıkıştırma	ton	0,1225	0,1225	64,95	64,95	7,96	7,96
Analiz Toplamı							18,90	17,23
%25 Kar							4,73	4,38
Toplam (m2 Birim Fiyatı)							23,63	21,61

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dört farklı tabakadan alınan diyatomit örnekleriyle, ağırlıkça üç farklı oranda bitüm modifikasyonu yapılmış ve elde edilen sonuçlar şahit bitüm numunesi (%0 Diyatomit) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca diyatomit numuneleri üzerinde karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- KD1, KD2, KD3 ve KD4 numune tabaka farklılıklarının bitüm reolojik davranışı üzerinde belirgin bir farkı görülmemiştir. Bununla birlikte ağırlıkça farklı diyatomit kullanımı tüm serilerde etkili olmuştur. Davranış üzerindeki olumlu etkiler %7 ve 12 diyatomit katkılı numnelerde belirginleşmiştir.
- DSR G/Sinδ sonuçlarına göre %17 diyatomit oranı malzemeyi çok gevrek hale getirdiğini düşünülmektedir. Buda tekerlek izi deformasyon bozulmalarını açısından olumsuzdur. Diyatomit tipine göre kullanım oranları %7 ve %12 arasında değişmektedir. Bu sonucu G/Sinδ sonuçlarında doğrulamıştır.
- Bu çalışma bitüm modifikasyonda sadece diyatomit örnekleri kullanılarak yapılan literatürdeki ilk çalışma niteliğindedir.. Bundan sonraki çalışmalarda Afyonkarahisar Seyidiler diyatomitlerinin başka katkı maddeleri ile birlikte araştırılmalıdır. Çünkü tez çalışmasında elde edilen sonuçlar diyatomitlerin yalnız başına kullanımı dahil bitüm reolojik özelliklerinin iyileştirdiğini göstermiştir. Bu diyatomitlerin farklı maddeler ile birlikte kullanımı pahalı katkı maddelerin kullanım oranlarına azaltılabilir. Buda daha ekonomik modifiye anlamın gelir.
- G/Sinδ grafiklerinde görüleceği gibi %12 ve %17 kullanım oranlarının en yüksek parametre verdiği belirlenmiştir. Fakat genel olarak tüm sonuçlara bakıldığında %12 kullanım değerinde daha iyi davranış sergilendiği görülmektedir. Nitekim literatürden incelendiğinde de %12 kullanım miktarının optimum miktar olarak tavsiye edildiği görülmüştür (Yang vd. 2018, Yue vd. 2019). Chen vd. (2015) diyatomitin bitümlü bağlayıcılara katkı maddesi olarak mühendislik için optimum değerini %12,8 önermişlerdir.

- Diyatomit katkılı bitümlerin yaşlanma eğilimlerinin azaldığı görülmüştür. Chen vd. (2015)'nin de belirttiği gibi diyatomitin gözenekli yapısının bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte %17 katkılı bitümlerde ise yaşlanma üzerindeki olumlu etkisi görülmemiştir.
- Diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerin genel olarak şahit bitüme göre viskozite değerlerin daha yüksek olduğu dolayısıyla buna paralel olarak karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Yapılan maliyet analizi sonucunda, SBS gibi pahalı katkılara göre diyatomit ile modifiye edilmiş bitümlerle üretilen asfalt kaplamaların birim maliyetlerinin daha ekonomik olduğu görülmüştür.
- Çalışma sonuçları diyatomitin bitüm reolojik özelliklerini geliştirdiğini, Lou vd. (2016), Yang vd. (2018)'nin de belirttiği gibi ekonomik bir modifikatör olarak bitüm modifikasyonunda, düşük ve orta trafik hacimli asfalt kaplamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.
- Yapılan çalışmalar sonucunda, Huang vd. (2019)'de belirttiği gibi diyatomit ile birlikte başka bir katkı maddesinin kullanımının bitüm reolojik sonuçlarını daha da geliştirebileceği düşünülmektedir. Bu da SBS, EVA vb. pahalı katkı maddelerinin daha az kullanılarak modifiye bitümlerden aynı performansın elde edilebilmesi anlamına gelebilir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmedzade P, Yılmaz M, Yılmaz M, 2007, Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Yöntemlerin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ASTM D 7175, 2015, Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2872-12e1, 2012, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D36/D36-09, 2009, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-And-Ball Apparatus), In Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using A Rotational Viscometer, In Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5550 - 14, 2014, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer, ASTM International.
- ASTM D70-03, 2003, Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method), ASTM International, West Conshohocken,
- Cao Z, Chen M, Yu J, Han X J J o C P, 2020, Preparation And Characterization of Active Rejuvenated SBS Modified Bitumen for The Sustainable Development Of High-Grade Asphalt Pavement, Journal Of Cleaner Production, 273, 123012.
- Cheng Y, Zhu C, Tan G, Lv Z, Yang J, Ma J, 2017, Laboratory Study on Properties of Diatomite and Basalt Fiber Compound Modified Asphalt Mastic, Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 1-10.

- Cheng Y, Zhu C, Tao J, Jiao Y, Yu D, Xiao B, 2018, Effects of Diatomite Limestone Powder Ratio on Mechanical and Anti-Deformation Properties of Sustainable Sand Asphalt Composite, Sustainability, 10.
- Cong P, Chen S, Chen H, 2012, Effects Of Diatomite On The Properties Of Asphalt Binder, Construction And Building Materials, 30, 495-499.
- Çetin M, Taş B, 2012, Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit, Tübvav Bilim Dergisi, 28-46.
- Çubuk K M, 1998, Katkı Maddesi Olarak Diyatomit'in Bitüm Sıcak Karışımların Davranışları Üzerindeki Etkileri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,185s, Ankara.
- Çubuk M,2007, Katkı Maddelerle Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Olusumunda Problemlerin Giderilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, PHD Tezi,232s, Ankara.
- Davar A, Tanzadeh J, Fadaee O, 2017, Experimental Evaluation of The Basalt Fibers and Diatomite Powder Compound On Enhanced Fatigue Life and Tensile Strength of Hot Mix Asphalt At Low Temperatures, Construction and Building Materials, 153, 238-246.
- Firoozifar S H, Alamdary Y A, Farzaneh O J p, Coal, 2010, Investigation of Novel Methods To Improve The Storage Stability and Low Temperature Susceptivity of Polyethylene Modified Bitumens, 52, 123-128.
- Griffith J, Puzinauskas V, 1963, Relation of Empirical Tests To Fundamental Viscosity of Asphalt Cement, Symposium on Fundamental Viscosity of Bituminous Materials.
- Guo Q, Li L, Cheng Y, Jiao Y, Xu C, 2015, Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture, Materials & Design (1980-2015), 66, 51-59.
- Güngör, G A, Orhan F, Kaşak S, Çubuk K, 2019. 5'inci Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara.

- Gürer C, 2014, Bitümlü Karışımlar. Yayımlanmamış Lisansüstü Ders Notları. Afyonkarahisar.
- Gürer C, Kardeş M, 2014, Sathi Kaplama Agregalarının Adezyon Özelliklerinin Araştırılması, *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*.
- Hassan N A, Ruzi, N A, Shukry N A M, Jaya R P, Hainin M R, Kamaruddin NH M, ve Abdullah M E, 2019, Physical Properties Of Bitumen Containing Diatomite and Waste Engine Oil, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences Vol. 15*, 528-531.
- Hassanpour-Kasanagh S, Ahmedzade P, Fainleib A M, Behnood A J C, *Materials B*, 2020, Rheological Properties Of Asphalt Binders Modified With Recycled Materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), *Construction and Building Materials*, 230, 117047.
- Huang W, Wang D, He P, Long X, Tong B, Tian J and Yu P, 2019, Rheological Characteristics Evaluation of Bitumen Composites Containing Rock Asphalt and Diatomite, *Applied Sciences*, 9.
- Hunter R N, Self A, Read J, 2014, *Shell Bitumen Hand Book*, ICE Publishing; 6th
- Hunter R N, Self A, Read J, Hobson E, 2015, *The Shell Bitumen Handbook*, Sixth Edition. ed. (789p), ICE Publishing London.
- Jiang L, Liu Q L, 2013, Application of Diatomite Modified Asphalt, *Applied Mechanics and Materials*, 477-478, 959-963.
- Kaşak S, 2007, Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit'in Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 188s, Ankara.
- Kaya D, Topal A, McNally T J C, *Materials B*, 2019, Relationship Between Processing Parameters and Aging With The Rheological Behaviour of SBS Modified Bitumen, *Construction and Building Materials*, 221, 345-350.
- Kietzman J, Rodier C J T R R, 1984, Effect of Diatomite Filler on Performance of Asphalt Pavements, 968, 8-19.

- Korkmaz B E, Karbon Lifi Katkılı İletken Asfalt Betonlarının Akıllı Buzlanma Önleyici Sistemlerde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 142, Afyon.
- Kök B V, Çolak H J C, Materials B, 2011, Laboratory Comparison of The Crumb-Rubber and SBS Modified Bitumen and Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 25, 3204-3212.
- Kuşcu M, Bağcı M, ve Yıldız, A, 2006, Konarı (İscehisar-Afyon) traki-andezitlerinin yapıtaşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu 2-3 Mart 2006, s.281-291, Afyonkarahisar.
- Kuşcu M, Yıldız, A, and Bağcı, M, 2003, Investigation of Ağın andesite as a building stone (İscehisar- Afyon, W-Turkey), International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones 10-13 Haziran 2003, P.243-253, İstanbul, Turkey.
- Laukkanen O V, Soenen H, Winter H H, Seppälä J J C, Materials B, 2018, Low-Temperature Rheological And Morphological Characterization of SBS Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 179, 348-359.
- Luo S, Chen N, Xui h, Tan B, Chen Q, 2016, Study on Indoor Pavement Performance of Diatomite-Modified Asphalt Mixture, Guangxi Science and Technology Project (14124004-4-16).
- Mallick R B, El-Korchi T, 2017, Pavement Engineering: Principles and Practice, 3rd ed, CRC Press, 775p, Boca Raton.
- McLeod N W, 1989, Relationship of Paving Asphalt Temperature Susceptibility as Measured by PVN to Paving Asphalt Specifications, Asphalt Paving Mixture Design and Asphalt Pavement Performance, Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 410-489.
- Metin S, Genç S ve Bulut V, 1987, Afyon ve Yakın Dolayının Jeolojisi, M.T.A. Raporu No: 2113, Ankara.
- Mitchell T M, Keller R M, Kedar Cabelli S T J M I, 1986, Explanation Based Generalization: A Unifying View, 1, 47-80.

- Mohd Shukry N A, Abdul Hassan N, Abdullah M E, Hainin M R, Yusoff N I M, Mahmud M Z H, Putra Jaya R, Warid M N M and Mohd Satar Mohd K I, 2018, Influence of Diatomite Filler on Rheological Properties of Porous Asphalt Mastic, *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 428-436.
- Morrison G R, Lee J K, Hesp S A, 1994, Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification, *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 231-240.
- Önal, M.A., Kahramangil, M, 1993, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, T.C. Bayındırlık Ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- PA.
- Puzinauskas V, 1967, Evaluation of Properties of Asphalt Cements With Emphasis on Consistencies At Low Temperatures.
- Rasmussen, Robert Otto, Robert L, Lytton F, and George K, Chang 2002, Method To Predict Temperature Susceptibility of An Asphalt Binder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 246-253.
- Read J, Whiteoak D, 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, Thomas Telford, Revised Edition, UK.
- Roberts F L, P S, Kandhal, E R, Brown D Y, Lee and T W Kennedy, 1996, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design, and Construction*, Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Sengoz B, Isikyakar G J C, Materials B, 2008, Evaluation of The Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, *Construction and Building Materials* 22, 1897-1905.
- Song Y, Che J, Zhang Y, 2011, The Interacting Rule of Diatomite and Asphalt Groups, *Petroleum Science and Technology*, 29, 254-259.
- TCK, (2013), *Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Teknik Şartnamesi*, Ankara.
- TS 118 EN 1426, 2002, *Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar İğne Batma Derinliği Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Wei H, He Q, Jiao Y, Chen J, Hu M, 2016, Evaluation of Anti-Icing Performance For Crumb Rubber and Diatomite Compound Modified Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 107, 109-116.
- Wei H, Li Z, Jiao Y, 2017, Effects of Diatomite and SBS on Freeze-Thaw Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixture, *Advances In Materials Science and Engineering*, 2017, 1-14.
- Xue Y, Wu S, Cai J, Zhou M, Zha J, 2014, Effects of Two Biomass Ashes on Asphalt Binder: Dynamic Shear Rheological Characteristic Analysis, *Construction and Building Materials*, 56, 7-15.
- Yang C, Xie J, Zhou X, Liu Q, Pang L, 2018, Performance Evaluation and Improving Mechanisms of Diatomite Modified Asphalt Mixture, *Materials (Basel)*, 11.
- Yıldız A, 1997, Seydiler (Afyon) Diyatomit Cevherinin Jeolojisi ve İzolasyon Tuğlası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Müh. A.B.D. 128s, Afyonkarahisar.
- Yıldız A, Kibici, Y ve Emrulloğlu Ö F, 1999, Seydiler (Afyon) Diyatomit Yatağının Jeolojisi Ve Mineralojisi, 1. Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu (BAKSEM'99), s.96-104, İzmir.
- Yılmaz M, Kök B V, 2008, Stiren Butadien Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Bıçaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4): 811-819.
- Yi-qiu T, Lei Z, Xing-you Z, 2012, Investigation of Low-Temperature Properties of Diatomite-Modified Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, 36, 787-795.
- Yue Y, Abdelsalam M, Luo D, Khater A, Musanyufu J, Chen T, 2019, Evaluation of the Properties of Asphalt Mixes Modified with Diatomite and Lignin Fiber: A Review, *Materials (Basel)*, 12.
- Yüknü K, Öztürk T, ve Komut M, (2020), Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapi Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

Zhang P, Guo Q, Tao J, Ma D, Wang Y,2019, Aging Mechanism of A Diatomite-Modified Asphalt Binder Using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Analysis, Materials, 12, 988.

Zhang Y B, Zhu H Z, Wang G A ,2012, Evaluation of Low Temperature Performance For Diatomite Modified Asphalt Mixture, advanced materials research, 246-251.

İnternet Kaynakları

1- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Diatomit>, 25.04.2021

2-<https://insapedia.com/diatomit-nedir-kullanim-alanlari-ve-ozellikleri/>, 20.04.2021

3- <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3207.pdf>, 22.04.2021

4-<https://www.birimfiyat.net/kgm-6405-s-m-5-cm-sikismis-kalinlikta-1-m2-asfalt-betonu-asinma-tabakasi-yapilmasi-kirilmis-ve-elenmis-sertas-ve-modifiye-bitum-ile>, 07.06.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali Nazar MORADI
Doğum Yeri ve Tarihi : Baghlan/Afghanistan / 1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 5534190074 / malinazar71@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Khatemull Anbiya (2010-2012)
Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, (2014-2018)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
(2018-2021)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :