

**T.C.**  
**BAYBURT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NANOKİL KULLANILARAK ASFALT BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Havanur Ebru GÜRBÜZ**

**Ağustos – 2018**

**BAYBURT**



**NANOKİL KULLANILARAK ASFALT BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Havanur Ebru GÜRBÜZ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ**

**T.C**  
**BAYBURT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NANOKİL KULLANILARAK ASFALT BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Havanur Ebru GÜRBÜZ**

**2018**

**BAYBURT**

**Her Hakkı Saklıdır**

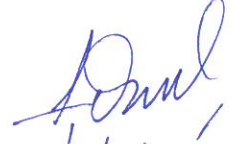
## TEZ ONAY SAYFASI

### Nanokil Kullanılarak Asfalt Bağlayıcı Özelliklerinin İyileştirilmesi

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ danışmanlığında, Havanur Ebru GÜRBÜZ tarafından hazırlana bu tez 16/08/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

İmza:



Üye : Doç. Dr. İlker TEKİN

İmza:



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ

İmza:



Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Metin UÇURUM

**Enstitü Müdürü V.**

**Not:** Bu tezde kullanılan ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Havanur Ebru GÜRBÜZ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NANOKİL KULLANILARAK ASFALT BAĞLAYICI ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Havanur Ebru GÜRBÜZ

Bayburt Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ

Bu çalışmada, nanokil katkı maddesinin asfalt bağlayıcının performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Katkı maddesinin yapısal özellikleri X-Işını Kırınımı (XRD) analizi ile incelenmiştir. Katkının asfalta ilave edilmesiyle oluşan modifiye asfalt bağlayıcıların morfolojik yapısı ve modifikasyon mekanizması sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizleriyle belirlenmiştir. Ayrıca katkı maddesinin ve modifiye asfalt bağlayıcıların termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi ile araştırılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri ise penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT), Dönel Viskozimetre (RV) ve Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyleri ile ortaya konmuştur. Deney sonuçlarından, katkının asfaltın kıvamını, tekerlek izi direncini ve kısa süreli yaşlanma direncini arttırdığı; uzun süreli yaşlanma sonrası yorulma direncini azalttığı belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen verilere göre, asfalt bağlayıcının performans özelliklerine en iyi etki eden katkı oranının %8 olduğu görülmüştür.

**2018, 114 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** Nanokil, modifiye asfalt, superpave, reoloji

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **IMPROVEMENT OF ASPHALT BINDER PROPERTIES USING NANOCLAY**

Havanur Ebru GÜRBÜZ

Bayburt University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Dr. Bahadır YILMAZ

In this study, the effect of the nanoclay additive on the performance features of the asphalt binder was assessed. Structural properties of the additive were investigated using X-ray diffraction (XRD) analysis. The morphological structure and modification mechanism of modified asphalt binders formed by adding the additive to the asphalt were determined by scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analyzes, respectively. In addition, the thermal properties of the additive and modified asphalt binders were investigated by differential scanning calorimetry (DSC) analysis. The physical and rheological properties of the modified asphalt were measured using penetration, softening point, ductility, dynamic shear rheometer (DSR), rolling thin film oven test (RTFOT), rotational viscometer (RV) and pressure aging vessel (PAV). The results indicate that the additive increased the asphalt's consistence, rutting and short-term aging resistance and decreased fatigue resistance after long-term aging. It was indicated that the best additive ratio to enhance the performance features of asphalt binder according to the data obtained from the experiments was 8%.

**2018, 114 pages**

**Keywords:** Nanoclay, modified asphalt, superpave, rheology

## TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek tez çalışmam süresince beni her zaman destekleyen, üzerimde emeği olan ve içtenliğiyle bana yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Bahadır YILMAZ'a (Bayburt Üniversitesi) çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Kendisinden ders aldığım, aynı zamanda tez savunma sınavımda yer alan ve bana önemli katkılar sağlayan ve beni her zaman samimiyetle destekleyen kıymetli hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ'a (Karadeniz Teknik Üniversitesi); ayrıca teze değerli katkılar sunan hocam Doç. Dr. İlker TEKİN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Kendilerinden ders aldığım ve her zaman bana destek verip benden yardımlarını esirgemeyen, bana önemli katkılar sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Şenol ÇAPKINOĞLU'na (Karadeniz Teknik Üniversitesi), Prof. Dr. Aykut AKGÜN'e (Karadeniz Teknik Üniversitesi), Prof. Dr. Mehmet ARSLAN'a (Karadeniz Teknik Üniversitesi), Doç. Dr. İrfan TEMİZEL'e (Karadeniz Teknik Üniversitesi) ve Arş. Gör. Muhammet Oğuz SÜNNETCİ'ye (Karadeniz Teknik Üniversitesi) teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yapısal analizlerimin yorumlanmasına yardım eden hocalarım Prof. Dr. Kemal SANCAK'a (Karadeniz Teknik Üniversitesi) ve Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ'a (Selçuk Üniversitesi) şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi destekleri ile bugünlere gelmemde büyük emek ve fedakârlıklar gösteren sevgili annem Yüksel GÜRBÜZ'e, sevgili babam Cengiz GÜRBÜZ'e ve en büyük dostum, ablam Bahar GÜRBÜZ'e minnettarım ve sonsuz teşekkür ederim.

Havanur Ebru GÜRBÜZ

Ağustos/2018



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>1</b>
1.1 Giriş.....	1
1.2 Konunun Özgeçmişi.....	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol .....	18
1.4 Bitüm.....	19
1.4.1 Asfaltın kimyasal yapısı.....	21
1.4.2 Asfaltın reolojisi.....	23
1.5 Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler .....	24
1.5.1 Geleneksel bağlayıcı deneyleri .....	24
1.5.1.1 Penetrasyon deneyi .....	24
1.5.1.2 Yumuşama noktası deneyi .....	25
1.5.1.3 Düktilite deneyi.....	26
1.5.1.4 Parlama noktası deneyi .....	27
1.5.1.5 İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT).....	28

1.5.1.6 Trikloretilende çözünürlük deneyi .....	29
1.5.1.7 Özgül ağırlık deneyi .....	29
1.5.1.8 Fraass kırılma noktası deneyi .....	30
1.5.2 Superpave bağlayıcı deneyleri .....	30
1.5.2.1 Dönel viskozimetre deneyi (Rotational Viscosimeter, RV).....	31
1.5.2.2 Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic shear rheometer, DSR).....	33
1.5.2.3 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling thin film oven test, RTFOT)36	
1.5.2.4 Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (Pressure aging vessel, PAV).....	37
1.5.2.5 Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending beam rheometer, BBR) .....	39
1.6 Asfalt Modifikasyonu .....	40
1.6.1 Asfalt katkı maddeleri ve katkılı asfaltlarda aranan özellikler.....	41
1.6.2 Asfalt katkı maddelerinin sınıflandırılması.....	42
1.7 Yapısal Analiz Yöntemleri.....	46
1.7.1 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR).....	46
1.7.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	47
1.7.3 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) .....	47
1.7.4 X-ışını kırınımı yöntemi (XRD) .....	47
1.8 Kil Minerali .....	48
1.8.1 Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	51
1.9 Organokil .....	56
<b>2. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>	<b>59</b>
2.1 Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması .....	61
2.2 Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi .....	62
2.2.1 FT-IR analizi .....	62
2.2.2 SEM analizi.....	63
2.2.3 DSC analizi .....	64

2.2.4 XRD analizi.....	64
2.3 Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	65
<b>3. BULGULAR ve İRDELEME .....</b>	<b>67</b>
3.1 Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları.....	67
3.1.1 XRD analiz sonuçları .....	67
3.1.2 FT-IR analiz sonuçları.....	68
3.1.3 DSC analiz sonuçları.....	69
3.2 Orijinal ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Analiz Sonuçları.....	70
3.2.1 FT-IR analiz sonuçları.....	70
3.2.2 DSC analiz sonuçları.....	74
3.2.3 SEM analiz sonuçları .....	77
3.3 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları .....	80
3.4 Düktilite Deney Sonuçları.....	82
3.5 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları.....	83
3.6 Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları .....	87
3.7 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları.....	91
3.8 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deney Sonuçları.....	99
<b>4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>101</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>104</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

Å	Angström
Al <sup>3+</sup>	Alüminyum İyonu
bar	Basınç Birimi
Ca <sup>2+</sup>	Kalsiyum İyonu
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat
cm	Santimetre
cP	Santipoise
dak	Dakika
dmm	Desimilimetre (0.1 mm)
d50	Tane Boyu Dağılım Grafiğinde %50'ye Karşılık Gelen Değer
Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	Demir İyonu
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (III) Oksit
g	Gram
G*	Kompleks Kayma Modülü
G'	Kompleks Kayma Elastik Modülü
G''	Kompleks Kayma Viskozite Modülü
G*/sinδ	Tekerlek İzi Dayanım Parametresi
G*.sinδ	Yorulma Direnci
H <sup>+</sup>	Hidrojen İyonu
Hz	Hertz
K <sup>+</sup>	Potasyum İyonu
kPa	Kilopaskal
Kilovolt	
Li <sup>+</sup>	Lityum İyonu

meq/100 g	Milieuşdeğer/100 g
mg	Miligram
Mg <sup>2+</sup>	Magenzyum İyonu
min.	Minimum
mL	Mililitre
mm	Milimetre
Na <sup>+</sup>	Sodyum İyonu
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amonyum İyonu
nm	Nanometre
Pa	Paskal
Pa.s	Paskal-saniye
Pen25	Asfaltın 25°C Sıcaklıktaki Penetrasyon Değeri
rad/s	Radyan/Saniye
r/dk	Devir/Dakika
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
Si <sup>4+</sup>	Silisyum İyonu
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Dioksit
sn	Saniye
tanδ	Kayıp Tanjantı
TiO <sub>2</sub>	Titanyum Dioksit
YN	Asfaltın Yumuşama Noktası Sıcaklık Değeri
ZnO	Çinko Oksit
°C	Santigrat Derece
δ	Faz Açısı
µm	Mikrometre
ΔS	Yaşlandırma Öncesi ve Sonrası Yumuşama Noktaları Arasındaki Fark

### **Kısaltmalar**

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AC	Asfalt Çimentosu

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopisi
APAO	Amorf Polialfa Olefin
ARES	İleri Reometrik Genleşme Sistemi
BA	Biyokütle
BBR	Eğilme Kirişi Reometresi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
Ca-MMT	Ca-Montmorillonit
CBE	Halkalı Borat Ester
CEC	Katyon Değişirme Kapasitesi
CL-30B	Nanokil
CNF	Karbon Nanofiber
-COOH	Karboksil Grubu
CRMA	Öğütülmüş Araç Lastiği ile Modifiye Edilmiş Asfalt
CTP	Kömür Katran Zifti
DDAC	Dioktadesil Dimetil Amonyum Klorid
DMP	2,6-Dimetilfenol
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
EAA	Etilen-Akrilik Asit Kopolimeri
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
ENR	Epoksitlenmiş Doğal Kauçuk
EVA	Etilen-Vinil-Asetat
FR	Alev Geciktirici
FT-IR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi
GC-MS	Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometresi
GTR	Öğütülmüş Araç Lastiği
GO	Grafen Oksit
HIPS	Yüksek Etkili Polistiren
HNO <sub>3</sub>	Nitrik Asit
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfirik Asit

IIR	İsobüten-İsopren Kopolimer
IR	Kızılötesi Spektrumu
MA	Maleik Anhidrit
MSCR	Çoklu Gerilme Sünme Toparlanma
NC	Organomontmorillonit Nanokil
NCP	Nanoseramik Toz
NHL	Nano Hidratlı (Sönmüş) Kireç
O	Oktahedral Birim
OFA	Atık Petrol Uçucu Külü
OMMT	Organofilik Montmorillonit
PAN-CF	Karbon Fiber Esaslı Parçalanmış Poliakrilonitril
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PE	Polietilen
PG	Performans Aralığı
PI	Penetrasyon İndeksi
PMA	Polimer Modifiye Asfalt Karışım
PP	Polipropilen
PPA	Polifosforik Asit
PPO	Polifenilen Oksit
PS	Polistiren
PVC	Polivinil-Klorid
Py-GC/MS	Kütle Spektrometresi İle Etkileşimli Piroliz Gaz Kromatografisi
RHA	Pirinç Kabuğu Külü
RPE	Geri Dönüştürülmüş Polietilen
RV	Dönel Viskozimetre
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
SBR	Stiren-Butadien-Kauçuk
SBS	Stiren-Butadien-Stiren
SEBS	Stiren-Etilen-Butilen-Stiren
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

SEM/EDS	Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi
SIS	Stiren-İzopren-Stiren
T	Tetrahedral Birim
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskopisi
TFOT	İnce Film Halinde Yaşlandırma Deneyi
TG	Termogravimetrik
TOR	Trans-Polioktenamer Kauçuk
TOT	Tetrahedral- Oktahedral- Tetrahedral yapı
TPE	Polietilen Esaslı Termoplastik Elastomer
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TSR	Çekme Mukavemeti Oranı
UV	Ultraviyole
VAI	Viskozite Yaşlanma İndeksi
VOC	Uçucu Organik Bileşik
WMA	Ilık Karışım Asfalt
WPE	Polietilen Ambalaj Atığı
WSA	Ahşap Talaşı Külü
WTR	Atık Lastik Kauçuğu
XRD	X-Işını Kırınımı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bitüm üretiminin şematik diyagramı .....	20
Şekil 1.2 Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması .....	21
Şekil 1.3 Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri .....	22
Şekil 1.4 Penetrasyon deneyi .....	25
Şekil 1.5 Yumuşama noktası deneyi .....	26
Şekil 1.6 Düktilite deneyi .....	27
Şekil 1.7 Parlama noktası deney aleti .....	28
Şekil 1.8 İnce film halinde ısıtma deneyi.....	29
Şekil 1.9 Piknometre deney aleti ve deneyin yapılışı .....	30
Şekil 1.10 Brookfield viskozimetre deney aleti .....	32
Şekil 1.11 Dinamik kayma reometresi çalışma şekli .....	34
Şekil 1.12 Dinamik kayma reometresi deney aleti .....	34
Şekil 1.13 Asfalt bağlayıcının viskoelastik özelliği.....	35
Şekil 1.14 Superpave performans sınıfı gösterimi .....	36
Şekil 1.15 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi .....	37
Şekil 1.16 PAV deneyi.....	39
Şekil 1.17 Kiriş eğme reometresi deney aleti .....	40
Şekil 1.18 Silis tetrahedronu .....	49
Şekil 1.19 Silis tetrahedronunun basitleştirilmiş hali .....	49
Şekil 1.20 Tetrahedral tabaka .....	49
Şekil 1.21 Alüminyum veya magnezyum oktahedronu .....	50
Şekil 1.22 Alüminyum veya magnezyum oktahedronunun basitleştirilmiş hali .....	50
Şekil 1.23 Oktahedral tabaka .....	51
Şekil 1.24 Montmorillonitin tabaka yapısı.....	53

Şekil 1.25 Montmorillonitin tabaka yapısının şematik diyagramı.....	53
Şekil 1.26 Montmorillonitin SEM görüntüsü .....	54
Şekil 1.27 Montmorillonit tabakasının boyutları .....	55
Şekil 1.28 Nanokilin yüzey işlemi .....	57
Şekil 2.1 Organomontmorillonit nanokil görüntüsü .....	59
Şekil 2.2 Modifiye asfalt bağlayıcıların hazırlanması .....	62
Şekil 2.3 FT-IR cihazı ve analiz aşamaları .....	63
Şekil 2.4 SEM cihazı ve iletken karbon bant üzerindeki asfalt bağlayıcı numuneleri .....	63
Şekil 2.5 DSC cihazı ve analizde kullanılan numuneler.....	64
Şekil 2.6 XRD analiz cihazı ve analizde kullanılan organomontmorillonit nanokil numunesi.....	65
Şekil 3.1 Organomontmorillonit nanokile ait XRD deseni.....	67
Şekil 3.2 Organomontmorillonit nanokilin FT-IR spektrumu .....	68
Şekil 3.3 Katkı maddesinin DSC eğrisi .....	69
Şekil 3.4 %0 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu .....	70
Şekil 3.5 %2 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu .....	71
Şekil 3.6 %4 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu .....	71
Şekil 3.7 %6 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu .....	72
Şekil 3.8 %8 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu .....	72
Şekil 3.9 Nanokil, orijinal ve %2-%8 katkı içeren asfalt bağlayıcı numunelerinin FT-IR spektrumları .....	73
Şekil 3.10 %0 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi.....	74
Şekil 3.11 %2 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi.....	75
Şekil 3.12 %4 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi.....	75
Şekil 3.13 %6 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi.....	76
Şekil 3.14 %8 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi.....	76
Şekil 3.15 Nanokil, orijinal ve %2-%8 katkıli asfalt bağlayıcı numunelerinin DSC eğrileri.....	77
Şekil 3.16 SEM görüntüleri; (a) %0 katkıli, (b) %2 katkıli, (c) %4 katkıli, (d) %6 katkıli, (e) %8 katkıli asfalt bağlayıcılar .....	80
Şekil 3.17 Penetrasyon deney sonuçları.....	81

Şekil 3.18 Yumuşama noktası deney sonuçları .....	81
Şekil 3.19 Sıcaklık Hassasiyetleri.....	82
Şekil 3.20 Düktilite deney sonuçları.....	83
Şekil 3.21 Kompleks kayma modülü değerleri.....	85
Şekil 3.22 $\delta$ değerleri .....	86
Şekil 3.23 $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	86
Şekil 3.24 Asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri.....	88
Şekil 3.25 Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği .....	89
Şekil 3.26 Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği (135°C-165°C).....	90
Şekil 3.27 Organomontmorillonit modifiyeli asfalt bağlayıcının şematik gösterimi	91
Şekil 3.28 RTFOT deneyi sonrası penetrasyon değerleri .....	92
Şekil 3.29 RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri.....	93
Şekil 3.30 RTFOT deneyi öncesi ve sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları.....	93
Şekil 3.31 RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri .....	95
Şekil 3.32 RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri.....	96
Şekil 3.33 RTFOT deneyi sonrası logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği .....	97
Şekil 3.34 RTFOT deneyi sonrası logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği (135°C-165°C) .....	98
Şekil 3.35 PAV sonrası $G^*.\sin\delta$ değerleri .....	100

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	Asfaltın kimyasal bileşimi .....	22
Çizelge 1.2	Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve parametreleri.....	31
Çizelge 1.3	DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türüne göre şartname sınır değerleri .....	35
Çizelge 1.4	Bağlayıcı sınıfına göre PAV deneyinin uygulanma sıcaklıkları.....	38
Çizelge 1.5	Asfalt katkı maddelerinin sınıflandırılması .....	43
Çizelge 1.6	Polimer ve polimer olmayan katkı maddeleri ve örnekleri .....	44
Çizelge 1.7	Yaygın kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi.....	45
Çizelge 1.8	Asfalt karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri.....	46
Çizelge 2.1	Orijinal asfalta ait fiziksel özellikler.....	60
Çizelge 2.2	Nanokilin özellikleri .....	61
Çizelge 3.1	DSR deney sonuçları .....	84
Çizelge 3.2	RV deney sonuçları, cP .....	88
Çizelge 3.3	135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri, cP .....	89
Çizelge 3.4	Asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları .....	90
Çizelge 3.5	RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri .....	92
Çizelge 3.6	RTFOT deneyi sonrası DSR deney sonuçları.....	94
Çizelge 3.7	RTFOT deneyi sonrası RV deney sonuçları .....	96
Çizelge 3.8	RTFOT deneyi sonrası 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri, cP.....	97
Çizelge 3.9	RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları .....	98
Çizelge 3.10	PAV deneyi sonrası DSR deney sonuçları .....	99

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1 Giriş

Asfalt kaplamalar, trafiğin ve hava şartlarının etkisinden dolayı bozulmaya uğrarlar (de Melo ve Trichês, 2017). Kaplamanın ömrü boyunca meydana gelen bu bozulmalar, yolun öngörülen hizmet süresini ve konfor düzeyini düşürür ve planlanan zamandan daha önce mevcut yollarda bakım-onarım çalışması yapılmasını gerektirir (Demirkaya, 2016; Yılmaz, 2016). Yolcu taşımacılığının yaklaşık %95'inin ve yük taşımacılığının yaklaşık %76'sının karayollarından sağlandığı ülkemizde karayollarının bakım-onarım masraflarının yapım maliyetlerini aşması ülkemiz açısından önemli bir kayba yol açmakta ve bunun önlenmesi için mevcut asfalt kaplama özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2006; Yılmaz, 2016).

Asfalt kaplamalar mineral agrega, filler, asfalt ve havadan oluşan çok fazlı karmaşık bir yapıdır (Ahmedzade vd., 2008). Asfalt karışımında bağlayıcı madde olarak genellikle asfalt kullanılır (Temel, 2016). Tunç'a (2004) göre karışımında kullanılan asfalt bağlayıcı miktarı %5-7 gibi düşük oranlarda olmasına rağmen kaplamanın performansı ve davranışı açısından büyük öneme sahiptir (Ahmedzade vd., 2008/2). Asfalt bağlayıcı, davranışı genellikle yüklenme süresine, sıcaklığa ve gerilme veya şekil değiştirme seviyesine bağlı olan bir maddedir (Nazari vd., 2018). Yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranırken, düşük sıcaklıklarda sert, elastik bir katı gibi davranmaktadır (Sağlık vd., 2012). Asfalt bağlayıcının ara sıcaklıklardaki davranışı ise viskoz ve elastik davranışların birleşimidir (Nazari vd., 2018). Viskoz hale geçen asfaltın kaplama tabakasının boşluklarına doğru akışıyla yüksek sıcaklıklarda tekerlek izinde oturma şeklinde ve orta sıcaklıklarda boyuna yönde ve/veya timsah sırtı şeklinde deformasyonlar görülürken düşük sıcaklıklarda sertleşen asfaltın kendi içerisinde veya temas yüzeyinden kırılmasıyla enine yönde gelişen çatlaklar ortaya çıkmaktadır (Sağlık vd., 2012). Sonuç olarak bu gibi deformasyonların oluşumunu azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek için asfalt bağlayıcılara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifikasyonlar yapılmaktadır. Asfalt modifikasyonu ve asfalt bağlayıcı özelliklerinin geliştirilebilmesi için reçineler, kauçuklar, polimerler, kükürt,

metal kompleksleri, fiberler ve kimyasal maddeler vb. kullanılmaktadır (Sun vd., 2016).

Dünya çapında nano materyaller birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yusoff vd., 2014). Son zamanlarda asfalt çimentosu ve karışım performansını iyileştirmek için katkı maddesi olarak nano malzemelerin kullanımı daha popüler hale gelmektedir (Iskender, 2016). Asfalt uygulamalarında kullanılan nano malzemeler; nano-karbon, nano-kil, nano-fiber, nano-TiO<sub>2</sub>, nano-silika, nano-hidratlı (sönmüş) kireç, nano boyutlu plastik tozlar veya polimerize tozlar, nano-tüpler şeklindedir (Yusoff, 2014; Li vd., 2017). Killerin ucuz olması ve az miktarda kullanılmalarına rağmen kullanıldıkları malzemelere iyi özellikler kazandırması ve bununla beraber killerin basit bir yer değiştirme tepkimesiyle kolayca organokillere dönüştürülebilmesi asfalt kaplamalarda nanokillerin kullanılabilirliğinin araştırılmasını önemli kılmaktadır (Yalçinkaya, 2008).

## 1.2 Konunun Özgeçmişi

Airey'e (2002) göre son zamanlarda, karayollarında trafik hacminin artması, yeni aks tasarımlarına sahip daha büyük ve daha ağır vasıtaların kullanılması ve bununla beraber artan lastik basınçları karayolu üzerindeki deformasyonların artmasına neden olmaktadır (Golestani vd., 2015). Bu durum kaplamalarda kalıcı deformasyonlara, yorulma çatlaklarına, düşük sıcaklık çatlaklarına ve suya karşı duyarlılığa neden olmaktadır (Uncu, 2017). Sonuç olarak bu gibi deformasyonların oluşumunu azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek için asfalt bağlayıcılara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifikasyonlar yapılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralı olarak verilmiştir.

El Rahman vd. (2012) tarafından, 60-80°C sıcaklıkta önceden oluşturulmuş perasetik asit (%59 sulu çözelti) kullanılarak elde edilen farklı yüzdelerde (%5, %10 ve %15) epoksitlenmiş doğal kauçuk (ENR) ile 60/70 penetrasyon dereceli asfalt karıştırılarak modifiye asfalt hazırlanmış olup sonra modifiye asfalta homojen karışımlar elde edilene kadar erimiş maleik anhidrit (MA) ilave edilmiştir. Marshall deneyi, kür süresi ve sertleştirici konsantrasyonuna bağlı olarak asfalt kaplama performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiş ve bu amaçla geçirgen karışım, agrega karışım

reçetesine göre hazırlanan agregalar ve %40 MA ile 150-170°C sıcaklıkta, 1600 rpm hızda ve 20 saat süreyle karıştırılmıştır. Modifiye edilmemiş asfaltın stabilitesi 11.500 Newton, akması 3.2 mm, uygun hava boşluğu değeri %3.7 iken; elde edilen verilerden %15 ENR + %40 MA ile karıştırılan asfaltın ise stabilitesinin 16.632 Newton, hava boşluğunun %2.5, akmasının 2.9 mm ve mineral boşluğunun %14,6 olduğu tespit edilmiştir.

Khatakt vd. (2012) tarafından, üç tip asfalt çimentosu (AC), değişik yüzdelerde karbon nanofiberle (CNF) modifiye edilmiş, asfalt bağlayıcının visko-elastik ve yorulma özellikleri araştırılmıştır. Dinamik kayma reometresi (DSR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri gerçekleştirilmiş olup deney sonuçlarından CNF katkısının orijinal asfaltın viskoelastik ve tekerlek izi direncini arttırdığı görülmüştür.

Wei vd. (2013) tarafından, iki tip ve dört ayrı yüzde (katkısız asfalt bağlayıcı ağırlığının %2, %4, %6 ve %8 oranlarında) amorf polialfa olefin (APAO) asfalt bağlayıcıya (AH-90) 165°C sıcaklıkta, 450 rpm karıştırma hızında ve 30 dakika süreyle ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcıların reolojik özellikleri dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve eğilme kırışi reometresi (BBR) deneyleri ile incelenmiştir. Deney sonuçlarından APAO katkısının asfalt bağlayıcının, yüksek sıcaklıklarda viskozitesini ve elastik özelliğini arttırdığı, kırılma sıcaklığını iyileştirdiği, sünme rijitliği ve sünme hızını olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Yoo ve Yun (2013) tarafından, asfalt bağlayıcı modifikasyonu için yüksek etkili polistiren (HIPS) ve 2,6-dimetilfenol (DMP) çözeltisi kullanılmıştır. HIPS ve DMP çözeltisinin asfalt bağlayıcı ile oksidatif çoklu yoğunlaşması (polikondansasyon) nedeniyle oluşan polifenilen oksitin (PPO) kristallik derecesini tahmin etmek için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. HIPS ve DMP modifiyeli asfalt bağlayıcının kimyasal özellikleri için FT-IR analizi yapılmıştır. Bunların yanı sıra modifiye asfalt bağlayıcının reolojik özellikleri dinamik kayma reometresi ve eğilme kırışi reometresi deneyleri kullanılarak araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda katkı maddesinin orijinal asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi direncini iyileştirdiği ancak düşük sıcaklıklardaki çatlama direncini önemli ölçüde etkilemediği bildirilmiştir.

Zhang ve Hu (2013) tarafından, polifosforik asit (PPA) ve kükürtün, Stiren-Butadien-Stiren (SBS) ve Stiren-Butadien-Kauçuk (SBR) modifiye asfaltlarının yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki depolama stabilitesi, fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda PPA'nın SBS modifiyeli asfaltın yüksek sıcaklık performansını belirgin bir şekilde iyileştirdiği ancak depolama stabilitesini azalttığı, kükürtün ise SBS modifiyeli asfaltın depolama stabilitesini ve yüksek sıcaklık performansını arttırdığı belirtilmiştir. Bunların yanı sıra SBR ve asfalt bağlayıcı arasında çok iyi bir uyumun olduğunu, sadece PPA ilavesiyle daha ileri bir modifikasyonun mümkün olabileceği kaydedilmiştir.

Lui vd. (2014) tarafından, lastik kırıntısı ile modifiye edilmiş asfaltın (CRMA) hazırlanması için asfalt ağırlığının %15, %20 ve %25 oranlarında lastik kırıntısı katkısız asfalta ilave edilmiştir. Tipik bir reaktif belirleyici olan trans-polioktenamer kauçuk (TOR) ise CRMA'ya sırasıyla %0 ve %4.5'lik iki yüzdede ilave edilmiştir. Farklı sıcaklıklardaki TOR katkısı olan ve olmayan CRMA'nın performansını değerlendirmek için penetrasyon, elastik geri dönme, yumuşama noktası, Brookfield viskozimetresi, dinamik kayma reometresi deneyleri; TOR ve CRMA'nin etkileşim mekanizmasını araştırmak için ise taramalı elektron mikroskopisi, Fourier kızılötesi dönüşümü spektroskopisi ve diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan TOR katkısının CRMA'nın mühendislik özelliklerini iyileştirmekle kalmadığı aynı zamanda asfalt kauçuğun performansını da arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca mikroskopik deneyler sonucunda CRMA'nın reolojik özelliklerini değiştiren ve asfalt bağlayıcının depolama stabilitesine katkıda bulunan TOR ve CRMA arasında karmaşık bir kimyasal reaksiyon olduğu da belirtilmiştir.

Parvez vd. (2014) tarafından, atık petrol uçucu külünün (OFA) %80'den fazla karbon içerdiği ve asfaltın performansını iyileştirmek için kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu doğrultuda OFA'nın asfalt içerisindeki dağılımını ve asfaltla kimyasal bağlanmasını iyileştirmek için karboksil grubu (-COOH) ile işlevselleştirilmesinde sülfirik asit ( $H_2SO_4$ ) ve nitrik asit ( $HNO_3$ ) kullanılmıştır. Alınmış ve işlenmiş OFA'yı karakterize etmek için termogravimetrik analiz, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ve birleştirilmiş SEM/EDS analiz teknikleri kullanılmıştır. OFA, katkısız asfalt bağlayıcıya %2-8 (asfalt bağlayıcı ağırlığının) oranlarında katılmıştır. OFA-



COOH'nin modifiye asfalt bağlayıcı reolojisine etkisi dinamik ve sabit kayma reolojik deneyleri ile araştırılmış ve dinamik sıcaklık aşaması deneylerini yapmak için de ileri reometrik genleşme sistemi (ARES) reometresi kullanılmıştır. Katkısız asfalt bağlayıcılara OFA-COOH ilavesinin, sabit ve dinamik kayma reolojisiyle gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre bağlayıcı özelliklerinde iyileşme olduğu kaydedilmiştir.

Xue vd. (2014) tarafından, pirinç kabuğu külü (RHA) ve ahşap talaşı külü (WSA) şeklinde iki çeşit biyokütle (BA) kullanılarak asfalt bağlayıcı modifiye edilmiştir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi analizi biyokütle küllerinin asfalt bağlayıcının kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini karakterize etmek için yapılmıştır. Modifiye asfaltların fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, ince film halinde ısıtma, dönel viskozimetre, depolama stabilitesi ve dinamik kayma reometresi deneyleri ile araştırılmıştır. Asfalt bağlayıcı ile BA arasında hiçbir kimyasal reaksiyon olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca modifiye asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerini geliştirmede RHA'nın WSA'ya kıyasla daha iyi bir etki gösterdiği belirtilmiştir.

Yusoff vd. (2014) tarafından, polimer modifiye asfalt (PG-76); asfalt bağlayıcı ağırlığının %0, %2 ve %4 konsantrasyonlarında nano-silika ile 160°C sıcaklıkta, 1500 rpm hızda ve 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Nano-silika ile karıştırılmış polimer modifiyeli asfalt karışımının (PMA) çeşitli yaşlanma ve nem duyarlılık koşulları altında performansını değerlendirmek amacıyla nem duyarlılığı, esneklik modülü ve dinamik sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskopu kullanılarak asfalt bağlayıcının mikroyapısı incelenmiştir. Nano-silika parçacıklarının asfalt bağlayıcı matrisi içerisinde iyi bir şekilde dağıldığı SEM görüntüleri ile belirlenmiştir. Nano-silika katkısının asfalt bağlayıcının nem hasarına karşı hassasiyetini azalttığı ve asfalt karışımlarının mukavemetini arttırdığı kaydedilmiştir. Ayrıca nano-silika parçacıklarının polimer modifiyeli asfaltın yorulma ve tekerlek izi direncini arttığı bildirilmiştir.

Li vd. (2015) tarafından, asfaltın modifikasyonu için farklı akrilik asit içeriğine sahip üç farklı etilen-akrilik asit kopolimeri (EAA) kullanılmıştır. Modifiye asfaltın yumuşama noktası, penetrasyonu, viskozitesi, yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesi,

mikroyapısı, reolojik özellikleri ve yapışma kapasitesi araştırılmıştır. EAA katkı miktarının artışıyla penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin arttığı belirtilmiş olup kompleks kayma modülünün ( $G^*$ ) artması ve kayıp tanjant değerinin ( $\tan\delta$ ) azalmasına bağlı olarak katkının asfaltın viskoelastik özelliğini iyileştirdiği kaydedilmiştir.

Wang vd. (2015) tarafından, öğütülmüş araç lastiği (GTR) ve polietilen esaslı termoplastik elastomerler (TPE) asfalt modifikasyonu için kullanılmıştır. TPE'ler sırasıyla desülfürizer (kükürt giderici) varlığında dinamik devulkanizasyon ve kükürtlü dinamik vulkanizasyon süreçleri ile hazırlanmıştır. TPE katkıları 180°C sıcaklıkta, 4000 rpm karıştırma hızında ve 30 dakika süreyle katkısız asfalta ilave edilmiş olup modifiye asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Hem katkı maddesinin hem de asfalt bağlayıcıların morfolojik yapısı ve özellikleri taramalı elektron mikroskopisi ve optik mikroskopisi, termal özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre, termogravimetrik, dinamik mekanik analizleri, yapı analizi Sol-jel analizi, fiziksel özellikleri ise penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve depolama stabilitesi deneyleri ile belirlenmiştir. Dinamik vulkanizasyon sürecinin TPE katkısını güçlendirirken dinamik devulkanizasyon sürecinin fiziksel özellikleri düşürdüğü belirtilmiştir.

Yan vd. (2015) tarafından, atık lastik kauçuğu (WTR) ve geri dönüştürülmüş düşük yoğunluklu polietilen (RPE) katkılarının asfalt bağlayıcının reolojik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Atık lastik kauçuğu asfalt bağlayıcıya asfalt ağırlığının %5, %10, %15 oranlarında ve düşük yoğunluklu polietilen katkısı asfalt ağırlığının %2, %3, %4, %5 oranlarında katkısız asfalta beraber katılarak modifiye asfalt numuneleri üretilmiştir. Numunler üzerine penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve Brookfield viskozimetresi, dinamik kayma reometresi ve eğilme kirişi reometresi deneyleri uygulanmıştır. Katkıların beraber kullanılmasıyla, asfalt bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerinin iyileştiği; sünme rijitliği ve sünme oranı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Yao vd. (2015b) tarafından, nano sönmüş kireç (NHL) orijinal asfalt bağlayıcıya (PG 58-28) asfalt ağırlığının %10 ve %20 oranlarında ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcılar ile agregalar karıştırılarak karışım numuneleri elde edilmiştir.

Karışımların, nem hassasiyeti ve çekme mukavemeti oranı (TSR) değerleri incelenmiştir. Ayrıca asfaltın polar ve polar olmayan kısımları Fourier dönüşümü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi azaltılmış toplam yansıma (ATR) ile test edilmiştir. FT-IR analiz sonuçlarından, karboksilik asitlerin ve ketonların asfaltta birincil yaşlanma ürünleri olduğu ve asfalt karışımlarının tekerlek izi direncini ve nem hassasiyetini bu iki karbonil grubunun etkilediği anlaşılmıştır. Ayrıca asfalt karışımlarında asfalt-agrega ve agrega-su sistemleri arasındaki su hasarı için mekanik itici kuvvetler araştırılmıştır. Arayüz sistemlerinin ve her bir ayrı sistemin (asfalt, su ve agrega) potansiyel enerjileri, adezyon enerjilerinin elde edilmesi için hesaplanmış ve asfalt-agrega ve agrega-su sistemleri arasındaki adezyon enerjisinin farklılığı asfalt karışımlarındaki nem hasarının temel sebebi olduğu belirtilmiştir.

Azhar vd. (2016) tarafından, atık yemek yağları ve bu yağların kimyasal modifikasyonunun asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Kızartma işlemine tabi tutulan yemek yağlarının kalitesinin etkilendiği ve artan asit değerinden dolayı asfalt bağlayıcının reolojik performansının azaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle, yüksek asit değerine sahip olan işlenmemiş atık yemek yağları kimyasal olarak modifiye edilmiş ve transesterifikasyona (bir esterin, asit ve baz katalizörler eşliğinde bir alkol ile muamele edilerek başka bir estere dönüştürülmesinde kullanılır) uğratarak alkalın katalizörler ile ön işleme tabi tutulmuştur. İşlenmiş atık yemek yağ numuneleri asit değeri deneyine, modifiye asfalt bağlayıcı numuneleri ise penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, dinamik kayma reometresi, dönel ince film halinde ısıtma deneyleri ve Fourier dönüşümü kızılötesi analizine tabi tutulmuştur. İşlenmemiş atık yemek yağının asit değeri 1.66 mL/g'den kimyasal modifikasyon ile 0.54 mL/g'ye düşürülmüş ve asit değerindeki bu düşüşün modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirdiği kaydedilmiştir.

Ge vd. (2016) tarafından, atık lastik kauçuğu (WTR, asfalt kütlesinin %5 ve %10 oranlarında) ve geri dönüştürülmüş polietilen (RPE, asfalt kütlesinin %2 ve %4 oranlarında) katkıları ayrı ayrı ve birlikte katkısız asfalt bağlayıcıya ilave edilmiştir. Modifikasyon mekanizmasını anlamak için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, floresan mikroskopisi, termogravimetrik (TG) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizlerini içeren morfolojik yöntemler, farklı sıcaklıklardaki

reolojik özelliklerin belirlenmesi için dinamik kayma reometresi, kiriş eğme reometresi ve geleneksel deneyler kullanılmıştır. WTR ve RPE ilave edildikten sonra asfalt bağlayıcının deformasyon direnci, yüksek sıcaklık stabilitesi ve esnekliğinin iyileştiği, kompleks kayma modülü değerinin arttığı ve faz açısı değerinin ise azaldığı belirtilmiştir.

Oruç ve Yılmaz (2016) tarafından, bor içeren ve kısaca adı halkalı borat ester (CBE) olan yeni bir katkı maddesi laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenmiştir. Katkı maddesi, asfalt ağırlığının %1, %2, %4 ve %6 oranlarında asfalt bağlayıcıya (B50/70 penetrasyon derecesine sahip) ilave edilmiş ve modifiye asfalt bağlayıcılar 15 dakika sürede, 1000 rpm karıştırma hızında ve 150°C sıcaklıkta karıştırılarak elde edilmiştir. Asfalt bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, parlama noktası, Fraass kırılma noktası, dinamik kayma reometresi, dönel viskozimetre, dönel ince film halinde ısıtma, basınçlı yaşlandırma kabı ve kiriş eğme reometresi deneyleri vasıtasıyla incelenmiştir. CBE ilavesiyle katkısız asfalt bağlayıcının yumuşama noktası, viskozite, parlama noktası değerlerinin ve tekerlek izi direncinin arttığı, sıcaklık hassasiyetinin azaldığı tespit edilmiştir.

Yao vd. (2016) tarafından, grafit nanolevhacıkları (asfalt ağırlığının %1 ve %2 oranlarında) asfalt bağlayıcıya (PG 58-28) 145°C sıcaklıkta, 2000 rpm karıştırma hızında ve 2 saat süreyle yavaş yavaş ilave edilmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dönel viskozimetre, modüler kompakt reometre, asfalt bağlayıcı termal kırılma, FT-IR ve elektromanyetik radyasyon emilim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülünün, viskozitesinin ve buna bağlı olarak agrega ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı, aktivasyon enerjisinin azaldığı, tekerlek izi direncinin ve çatlama eğiliminin iyileştiği belirtilmiştir.

Zhang vd. (2016) tarafından, geri dönüştürülmüş atık ambalaj polietilen (WPE) ve karbon fiber esaslı parçalanmış poliakrilonitril (PAN-CF), asfalt özelliklerinin iyileştirilmesi için 170°C sıcaklıkta katkısız asfalt ile 3800 r/dk hızda, 60 dakika süre boyunca karıştırılmıştır. PAN-CF içeriği ağırlıkça %0 ile %0.12 aralığında değişirken WPE içeriği asfalt ağırlığının %4 oranında sabit tutulmuştur. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcılara yumuşama noktası, penetrasyon ve düktilite deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca modifiye asfalt bağlayıcıların mikroyapısının belirlenebilmesi için taramalı elektron mikroskopisi ve floresan mikroskopisi analizleri uygulanmış olup modifikasyon mekanizması Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ile değerlendirilmiştir. PAN-CF ve WPE katkıları ile asfaltın fiziksel olarak karıştığı tespit edilmiştir. Çok fazla karbon fiberin (CF) asfalt bağlayıcı içerisinde kümelenmesinden ötürü asfalt performansının olumsuz etkilendiği ve bu nedenle PAN-CF katkı miktarının %0.1 oranını geçmemesi gerektiği bildirilmiştir. Ayrıca asfalt bağlayıcı içerisinde en iyi dağılımın elde edilebilmesi için 5 mm'lik fiber uzunluğunun uygun olduğu beyan edilmiştir.

Enieb ve Diab (2017) tarafından, nanosilika katkısı asfalt bağlayıcıya %0, %2, %4 ve %6 oranlarında ilave edilmiştir. Asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite deneyleri ve nanosilika ile asfalt bağlayıcı arasındaki kimyasal bağların tespiti için FT-IR analizi yapılmıştır. Asfalt karışımların performans özellikleri; esneklik modülü, dolaylı çekme mukavemeti, kırılma enerjisi, nem duyarlılığı ve yorulma deneyleri ile ortaya konulmuştur. Nanosilika katkı ilavesinin asfalt bağlayıcı ve karışım özelliklerini olumlu etkilediği ve daha dayanıklı yol kaplamalarının inşası için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Ge vd. (2017) tarafından, ılık karışım asfaltın (WMA) üretimi için %3 Sasobit katkısı ile beraber sırasıyla katkısız asfalt ağırlığının %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında dört farklı polifosforik asit (PPA) katkısı kullanılmıştır. Asfaltın yaşlanmasını belirlemek için dönel ince film halinde ısıtma ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri yapılmıştır. Asfaltın fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve kırılgan eğilme reometresi (BBR) deneyleri ile tespit edilmiştir. Modifikasyon özellikleri Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, floresan mikroskopisi, termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri ile değerlendirilmiştir. Sasobit ve PPA ilave edildikten sonra asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

Han vd. (2017) tarafından, asfaltın yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmek amacıyla pirinç kabuğu külü asfalt ağırlığının %1, %3, %5, %7, %9 ve %11 oranlarında katkısız

asfalta ilave edilmiştir. Pirinç kabuğu külünden dolayı artan viskoziteyi azaltmak için biyo yağ ilavesi yapılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. RHA, biyo yağ ve asfalt bağlayıcı arasındaki modifikasyon mekanizması taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri ile belirlenmiştir. Katkıların asfalt bağlayıcının yüksek-düşük sıcaklık performansını ve yorulma direncini iyileştirdiği kaydedilmiştir.

Hussein vd. (2017) tarafından, seramik atıklarından üretilen inorganik nanoseramik toz (NCP) asfalt bağlayıcı ağırlığının %2, %4 ve %6 oranlarında asfalt bağlayıcıya ilave edilmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcılara, geçirimli elektron mikroskopisi, floresan spektroskopisi, X-ışını kırınımı, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) analizleri yapılmıştır. Numunelerin fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik kayma reometresi deneyleri ile incelenmiştir. Morfolojik analiz sonuçları, Si-O-Si gerilme titreşimi ile hidrokarbon molekülleri arasında bir etkileşimin olduğunu ortaya koymuştur. Bu etkileşimin viskoziteyi arttırdığı ve asfaltten parçacıklarını yeniden bir araya getirdiği belirtilmiştir. Ayrıca NCP katkısının, asfalt bağlayıcının kıvamını ve yumuşama noktası sıcaklığını arttırdığı, yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Li, P. vd. (2017) tarafından, öğütülmüş araç lastiği katkısı asfaltın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Öğütülmüş araç lastiği ile modifiye edilmiş asfalt (CRMA) numuneleri farklı koşullar (lastik kırıntısı dozajı, hazırlama sıcaklığı, işlem süresi) altında hazırlanmıştır. Optik mikroskop ile morfolojileri incelenmiştir. Katkının asfalt bağlayıcı içerisindeki etkileşimini tespit etmek için kızılötesi spektrumu (IR), diferansiyel taramalı kalorimetre, gaz kromatografi-kütle spektrometresi (GC-MS) analizleri yapılmıştır. Katkının şişme ve bozunma davranışı göz önüne alındığında optimum katkı oranının %20 olması, karıştırma sıcaklığının 195°C'yi ve karıştırma süresinin 1,5 saati geçmemesi gerektiği önerilmiştir.

Li, R. vd. (2017) tarafından, asfalt bağlayıcılarda kullanılan nano yapıdaki çeşitli katkıların, karıştırma ve analiz tekniklerinin nasıl yapılacağı üzerine çalışma yapılmıştır. Viskozite, dinamik modül, sertlik, tekerlek izi derinliği, dolaylı çekme

mukavemeti gibi deney sonuçlarından nano katkılarla modifiye edilen asfaltların reolojik ve mühendislik performansları belirlenmiştir. Atomik kuvvet mikroskopisi, taramalı elektron mikroskopisi, X-ışını kırınımı ve FT-IR analizleri gibi bazı yenilikçi teknikler ile mikro yapıları ve moleküler bileşenleri araştırılmıştır. Nano yapıdaki katkıların asfalt bağlayıcının viskozite, yaşlanma, yorulma, neme karşı direnç ve yüksek sıcaklık özelliklerini arttırdığı belirtilmiştir.

Sun vd. (2017) tarafından, asfaltın yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performansını iyileştirmek için nano ve polimer katkıları kullanılmıştır. Nano malzemeler olarak  $\text{SiO}_2$ , bentonit,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{ZnO}$ ; polimerler olarak ise Stiren-Butadien-Kauçuk, Stiren-Butadien-Stiren, polietilen (PE) katkıları tercih edilmiştir. AH-70 tipi asfalt bağlayıcıya ayrı ayrı olmak üzere nano ve polimer malzemeler ilave edilerek modifiye asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, viskozite, RTFOT, DSR ve BBR deneyleri yapılmıştır. En iyi sonucun %0.5  $\text{SiO}_2$  + %5 SBR + %1 PE içeriğinden oluşan asfalt bağlayıcıdan elde edildiği bildirilmiştir.

Xue vd. (2017) tarafından, kömür katran zifti (CTP) kullanılarak katkısız asfalt modifiye edilmiştir. Elde edilen modifiye asfaltın yumuşama noktası, duktilite, penetrasyon ve esneklik modülü özelliklerine karıştırma koşullarının (mekanik mikser ve yüksek parçalayıcı mikser kullanılarak) etkisi araştırılmıştır. CTP modifiyeli asfaltın grup kompozisyonlarının belirlenmesi için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi analizi gerçekleştirilmiştir. CTP katkısının katkısız asfalt bağlayıcı ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Katkısız asfaltın yol performansının CTP katkısıyla iyileştiği ve yüksek parçalayıcı mikser ile üretilen numunelerin mekanik mikser ile üretilen numunelere kıyasla daha iyi performans gösterdiği kaydedilmiştir. Ayrıca %15 CTP oranının karıştırma koşulları altında uygun olduğu belirtilmiştir. CTP katkısının asfaltın elastik deformasyonunu azaltabileceği ve yaşlanmaya karşı direncini arttırabileceği kaydedilmiştir.

Liu vd. (2018) tarafından, değişik grafen oksit (GO) oranlarının katkısız asfalt bağlayıcı ve SBS modifiyeli asfalt bağlayıcının performans özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Yaşlandırılmamış ve RTFO yöntemi ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi,

çoklu gerilme sünme toparlanma (MSCR), kiriş eğilme reometresi, diferansiyel taramalı kalorimetre ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi analizleri ile değerlendirilmiştir. Eser miktarda GO katkısının (asfalt bağlayıcı ağırlığının en fazla %0.2'si) katkısız ve SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların viskozitesini, esneklik modülünü ve tekerlek izi direncini iyileştirdiği beyan edilmiştir.

Nazari vd. (2018) tarafından,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{CaCO}_3$  maddelerinin farklı inorganik nanopartikül yapıları asfalt ağırlığının %2 ve %4 oranlarında 60/70 penetrasyon dereceli asfalta ilave edilmiştir. Nanokompozitlerin kimyasal ve mikroyapısal özellikleri sırasıyla X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskopisi analizleri ile değerlendirilmiştir. Katkısız asfalt bağlayıcı ve nanopartikül modifiyeli numunelerin viskoelastik özellikleri ve yorulma performansı frekans sünme, doğrusal genlik sünme ve zaman sünme deneyleri kullanılarak incelenmiş olup oksidatif yaşlanma etkisi Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi analizi ile araştırılmıştır.  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{CaCO}_3$  nanopartiküllerinin asfalt bağlayıcının yaşlanma direncini arttırdığı,  $\text{SiO}_2$  katkısının ise yorulma direncini iyileştirdiği kaydedilmiştir.

Zhang vd. (2018) tarafından, stiren-izopren-stiren (SIS) modifiyeli asfaltın özelliklerinin iyileştirilmesi ve asfalttaki SIS içeriğinin azaltılması amacıyla katkısız asfalt bağlayıcıya SIS, polifosforik asit (PPA) ve kükürt katkıları ilave edilmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcıların fiziksel, reolojik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Uygun PPA katkısının asfalt bağlayıcının yüksek ve düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirdiği ve olumsuz etkisi olmadan SIS içeriğini azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca kükürt katkısının kullanımının katkısız asfalt bağlayıcının depolama stabilitesini büyük ölçüde iyileştirdiği ve yaşlanma direncini arttırdığı tespit edilmiştir.

Asfalta nanokil/organokil katılarak yürütülen çalışmalara aşağıda yer verilmiştir:

Jahromi ve Khodaii (2009) tarafından, modifiye edilmemiş ve nanokil ile modifiye edilmiş asfalt üzerinde fiziksel ve reolojik deneyler (penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası, dinamik kayma reometresi) gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla iki tip nanokil kullanılmıştır: nanofil-15 ve cloisite-15A. X-ışını kırınımı (XRD) analizi vasıtasıyla nanokil levhacıklarının nanoyapılı eksfoliasyonu incelenmiştir. Nanokil modifikasyonun asfaltın sertliğini arttırdığı ve modifiye edilmemiş asfalta kıyasla faz açısı değerini azalttığı (yaşlanma etkisi) kaydedilmiştir.



Yu vd. (2009) tarafından, organo-montmorillonit (OMMT) katkısının asfaltın termo-oksidatif ve ultraviyole (UV) yaşlanma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Katkısız asfalta asfalt ağırlığının %3 oranında OMMT ilave edilmiş ve 5000 r/dk hızda, 60 dakika süre boyunca karıştırılarak modifiye asfalt bağlayıcı numuneler elde edilmiştir. OMMT modifiyeli asfaltın morfolojik yapısı X-ışını kırınımı analizi ile fiziksel ve reolojik özellikleri ise yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite, Brookfield viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleriyle belirlenmiştir. OMMT katkısıyla asfaltın viskozite yaşlanma indeksi (VAI) ve sıcaklık farkı ( $\Delta S$ ) değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

You vd. (2011) tarafından, nano katkı maddeleri kullanılarak modifiye asfaltların hazırlanmasını ve karakterizasyonunu içeren bir çalışma yürütülmüştür. Nanokil A ve Nanokil B katkıları, %2 ve %4 oranlarında asfalt bağlayıcıya yüksek sıcaklıkta ayrı ayrı katılmış ve dönel viskozimetre, dinamik kayma modülü ve doğrudan çekme deneyleri yapılmıştır. Katkıların asfaltın viskozitesini ortalama %41 ve %112 oranlarında, dinamik kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) değerini ise belirgin bir şekilde arttırdığı bildirilmiştir.

El-Shafie vd. (2012) tarafından, makrokil ve modifiye nanokil asfalt ağırlığının %2, %4, %6 ve %8 oranlarında 60/70 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcıya ilave edilmiştir. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve kinematik viskozite deneyleri ile mekanik özellikleri ise çekme mukavemeti deneyi ile belirlenmiş olup katkısız asfalt bağlayıcı ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda yumuşama noktası ve kinematik viskozite değerlerinde artış, penetrasyon değerinde azalış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bağlayıcıdaki en iyi iyileşmenin %6 nanokil oranında sağlandığı kaydedilmiştir.

Fang vd. (2012) tarafından, organofilik montmorillonit (OMMT) (%1, %2, %3 ve %4 oranlarında) ve polietilen ambalaj atığı (WPE) (%8 oranında) asfalt için birleştirilmiş modifiyer olarak kullanılmış ve modifiye asfaltın mikroyapısı ve performansı incelenmiştir. Organofilik montmorillonit, dioktadesil dimetil amonyum klorid (DDAC) kullanılarak Ca-montmorillonitin (Ca-MMT) iyon değişimiyle hazırlanmıştır. OMMT ve Ca-MMT'nin yapısı FT-IR, XRD ve SEM analizleriyle incelenmiştir. Modifiye asfaltın özellikleri ise FT-IR analizi, Floresan mikroskopisi,

penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri ile belirlenmiştir. Deney sonuçları, OMMT ilavesinin WPE'nin asfalt içinde dağılımı için faydalı olduğunu ve elde edilen modifiye asfaltın çok iyi yüksek sıcaklık kararlılığına, düşük sıcaklıkta çatlama önleyici performansa ve deformasyon direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Bonati vd. (2013) tarafından, geleneksel mineral dolgu maddesinin spesifik alev geciktiricilerle (FR) yer değiştirmesine ve organokillerle nano-modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların kullanılmasına dayanan ateşe dayanıklı özelliklere sahip asfalt karışımlarının formülasyonuna değinilmiştir. Koni kalorimetre deneyi ile asfaltın yangın davranışı ve duman tahliye özellikleri değerlendirilmiştir. FR filler ve nanokompozit katkılarının birlikte kullanımıyla asfaltın yangın davranışının önemli ölçüde değiştiği ve iyileştiği belirtilmiştir.

Jasso vd. (2013) tarafından, SBS kopolimeri ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıya organik olarak modifiye edilmiş kil ve kükürt bazlı bir bileşik ilave edilmiştir. Bu katkı malzemelerinin asfalt bağlayıcının reolojik özellikleri üzerine etkisi üç faktörlü ve beş aşamalı istatistiksel deney vasıtasıyla incelenmiştir. Karışımlar geleneksel fiziksel karıştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Organokilin, katkısız asfalt bağlayıcının reolojik özellikleri ve özellikle servis sıcaklıkları üzerinde olumlu bir etkisi olduğu bildirilmiştir.

Yang ve Tighe (2013) tarafından, nano materyallerin asfalt bağlayıcı ve asfalt karışımlarda katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili incelemeler gerçekleştirilmiştir. Nanokil, nanosilika ve nanotüpler gibi nano partiküllerin asfaltın viskozitesini, tekerlek izi ve yorulma direncini arttırdığı belirtilmiş olup polimer modifiye asfaltlarda ikinci modifiyer olarak nanokil kullanımının, polimer modifiye asfaltların depolama stabilitesini ve yaşlanma direncini arttırdığı bildirilmiştir. Bununla birlikte uygun nano materyal seçimiyle nano modifiye asfaltların soğuk bölgelerde kullanılabileceği kaydedilmiştir.

Yao vd. (2013) tarafından, nanomer I.44P, karbon mikrofiber, modifiye olmayan nanokil ve polimer modifiye nanokil katkıları orijinal asfalt bağlayıcıya ilave edilmiştir. Asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülünün ( $G^*$ ) ve mikro yapısının incelenebilmesi için sırasıyla dinamik kayma reometresi deneyi ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi analizi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre nanomer

I.44P, karbon mikrofiber, modifiye olmayan nanokil katkılarıyla modifiye edilen asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin arttığı ve tekerlek izi dirençlerinin iyileştiği belirtilmiştir. Polimer modifiye kil ilavesinin ise katkısız asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülü değerini azalttığı ve yorulma çatlamaına karşı direncini arttırdığı tespit edilmiştir.

Golestani vd. (2015) tarafından, katkısız asfalt bağlayıcıya farklı oranlarda doğrusal yapıya sahip SBS polimeri ve nanokil katkıları ayrı ayrı ve birlikte ilave edilmiş olup üç ayrı modifiye asfalt bağlayıcı hazırlanmıştır (nano modifiyeli asfalt, polimer modifiyeli asfalt ve nanokompozit modifiyeli asfalt). Asfalt karışımlar için kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcıların ve karışımların fiziksel, mekanik ve reolojik özellikleri; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, elastik geri dönme, viskozite ve dinamik kayma reometresi, nem duyarlılığı, esneklik modülü, dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi deneyleri ile ortaya konulmuştur. Nanokil katkısının polimer modifiyeli asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini arttırdığı, depolama stabilitesini iyileştirdiği belirtilmiştir. Bu iyileştirilmiş bağlayıcı özellikleri sayesinde asfalt karışım numunelerinin çekme mukavemeti ve esneklik modülü değerlerinin arttığı, tekerlek izi direncinin ise iyileştiği kaydedilmiştir.

Yao vd. (2015a) tarafından, kuru ve yeterli oksijen koşulları altında yaşlanmanın asfalt bağlayıcılar üzerindeki etkisi incelenmiş olup asfalt karışımlarının yorulma ve tekerlek izi ile ilgili fonksiyonel grupları tanımlanmıştır. Yaşlanma etkisinin incelenmesi için katkısız asfalt bağlayıcıya polimer modifiye nanokil, modifiye edilmemiş nanokil ve nanosilika katkıları ilave edilmiştir. Asfalt sistemindeki fonksiyonel grupların anlaşılması için sırasıyla kısa ve uzun süreli yaşlandırma yöntemlerinden dönel ince film halinde ısıtma ve basınçlı yaşlandırma kabı deneyleri yapılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcıların Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi analizi vasıtasıyla kimyasal grup spektrumları araştırılmıştır. FT-IR analizi sonuçlarına göre hava ve oksijene maruz kalan karboksilik asitlerin ve ketonların asfalt bağlayıcılardaki esas yaşlanma bileşenleri olduğu kaydedilmiştir.

Abdullah vd. (2016a) tarafından, ılık asfalt (asfalt ağırlığının %1, %2 ve %3 oranlarında) ve nanokil (asfalt ağırlığının %4 oranında) katkıları 80/100 penetrasyon

sınıfına ait asfalt bağlayıcıya ilave edilmiştir. Asfalt karışımlarda agrega olarak granit kullanılmıştır. Çeşitli karıştırma (145°C, 135°C ve 125°C) ve sıkıştırma (135°C, 125°C ve 115°C) sıcaklıklarında hazırlanan ılık asfalt karışımların mekanik özellikleri dolaylı çekme esneklik modülü, dinamik sünme, nem duyarlılığı, tekerlek izi ve dolaylı çekme yorulma deneyleri ile değerlendirilmiş olup sıcak asfalt karışım numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Nanokil ve ılık asfalt katkı maddelerinin modifiyer olarak etkili bir şekilde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Abdullah vd. (2016b) tarafından, asfalt bağlayıcıların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla 80/100 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcıya farklı yüzdelerde Nanokil A (ağırlıkça %35-45 dimetil dialkil amin ile modifiye edilmiş montmorillonit kil yüzeyi), Nanokil B (ağırlıkça %35-45 oktadesilamin ve ağırlıkça %0.5-5.0 aminopropil-trietoksisilan ile modifiye edilmiş montmorillonit kil yüzeyi) ve ılık asfalt katkısı (yağlı poliamin polimer iyonik olmayan bileşen) ilave edilmiştir. Katkısız ve modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, dinamik kayma reometresi, giriş eğilme reometresi ve serbest yüzey enerjisi deneyleri ile belirlenmiştir. Nanokil B ve ılık asfalt katkısının, katkısız asfalt bağlayıcınının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca nanokil B katkısının asfalt bağlayıcınının tekerlek izi ve yorulma direncini arttırdığı kaydedilmiştir.

Ameri vd. (2016) tarafından, 60/70 penetrasyon dereceli asfalt, Cloisite 15-A ve Cloisite 30-B tipi nanokil katkılarıyla beraber kırma kireçtaşı agregası kullanılarak sıcak asfalt karışım numuneleri üretilmiştir. Nanokil katkılarının asfalt karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkileri dolaylı çekme ve dört nokta eğilme deneyleri ile irdelenmiştir. Çalışma sonucunda nanokil katkılarının orta sıcaklıkta asfaltın yorulma ömrünü arttırdığı, düşük sıcaklıkta ise olumsuz etkilediği ortaya konmuştur.

Ashish vd. (2016) tarafından, yeni benimsenen deney yöntemlerine dayanılarak nanokil (CL-30B) modifiyeli asfalt bağlayıcınının tekerlek izi, yorulma ve nem hasarı performansları değerlendirilmiştir. Katkı ilavesiyle asfalt bağlayıcınının tekerlek izi performansının iyileştiği ve yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

Ezzat vd. (2016) tarafından, nanokil ve nanosilika katkıları asfalt ağırlığının %3, %5 ve %7 oranlarında katkısız asfalt bağlayıcıya ayrı ayrı ilave edilmiştir. Nanosilika

katkısı, silis dumanı ve pirinç kabuğundan üretilmiştir. Katkısız ve modifiye asfalt bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Silis dumanından sentezlenen nanosilika katkısının katkısız asfalt bağlayıcının penetrasyon değerini azalttığı ve yumuşama noktası sıcaklığını arttırdığı, pirinç kabuğundan elde edilen nanosilika katkısının ise katkısız asfalt bağlayıcının viskozitesini iyileştirdiği belirtilmiştir. İlave olarak nanokil katkısıyla modifiye edilen asfalt bağlayıcının penetrasyon değerinin arttığı, yumuşama noktası sıcaklığının azaldığı beyan edilmiştir.

Farias vd. (2016) tarafından, geleneksel asfalt ve polimer modifiyeli asfalt için katkı maddesi olarak organomontmorillonit ve nanokil Cloisite 20Å (CLO) maddeleri kullanılmıştır. Asfalt, %4 nanokil (OMMT ve CLO), %4 SBS ve %4 SBS/nanokil ile modifiye edilmiş ve elde edilen modifiye asfalta viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kayma reometresi ve depolama stabilitesi deneyleri yapılmıştır. Dene sonuçlarından katkı maddeleriyle beraber katkısız asfaltın kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) değerinin arttığı, faz açısı ( $\delta$ ) değerinin ise azaldığı bildirilmiştir.

Iskender (2016) tarafından, nanokil modifiyeli asfalt karışımlarının performansı araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı nanokil A-B-C katkısı üç farklı oranda (%2, %3.5 ve %5) filler olarak asfalt karışımında kullanılmıştır. Nanokil A, nanokil B ve nanokil C malzemeleri sırasıyla Eskişehir-Kütahya, Eskişehir ve Çanakkale bölgelerindeki bentonit killerinden elde edilmiştir. Asfalt karışımların çatlama, soyulma ve tekerlek izi özellikleri Modifiye Lottman ve dinamik sünme deneyleriyle incelenmiş olup nanokil modifiyerlerinin %2 gibi düşük bir oranda kullanılmasıyla bu özelliklerin iyileştiği görülmüştür.

Zapién-Castillo vd. (2016) tarafından, SEBS (stiren-etilen-butilen-stiren) blok kopolimeri ve montmorillonit nanokil katkıları eriyik karıştırma tekniği ile birleştirilerek nanokompozit bir ürün elde edilmiştir. Elde edilen bu ürün (asfalt bağlayıcı ağırlığının %3, %4 ve %6 oranlarında) katkısız asfalt bağlayıcı ile 180°C sıcaklıkta, 1200 rpm hızda ve 90 dakika süre boyunca karıştırılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcılara dönel viskozimetre, yumuşama noktası, penetrasyon, dinamik kayma reometresi deneyleri ve floresan mikroskopisi analizi yapılmıştır. Nanokompozit katkı

maddesi ilavesiyle asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir.

de Melo ve Trichés (2017) tarafından, organofillik nanokil (montmorillonit) katkısının asfalt karışım özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Modifiye asfalt karışımların nem hasarı, kalıcı deformasyon ve yorulma dirençleri değerlendirilmiştir. Katkı ilavesiyle kaplamanın bozulmaya karşı direncinin arttığı bildirilmiştir.

Li vd. (2017) tarafından, katkısız asfaltın modifikasyonu için organo-montmorillonit nanokil kullanılmış ve organo-montmorillonit nanokilin asfaltın uçucu organik bileşik (VOC) emisyonunu engelleme üzerindeki etkisi, kütle spektrometresi (Py-GC/MS) ile bağlantılı piroliz gaz kromatografisi vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Nanokilin, asfaltın VOC emisyonunu etkin bir şekilde engellediği görülmüştür.

Vargas vd. (2017) tarafından, modifiye edilmemiş montmorillonit ve iki farklı tipteki modifiye organo-montmorillonit katkıları asfalt modifikasyonu için kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcılar üzerinde reolojik deneyler gerçekleştirilmiştir. Montmorillonit levhacıklarının asfalt içindeki nanoyapı dağılımı, X-ışını kırınımı, geçirimli elektron mikroskopisi (TEM) ve floresan mikroskopisi kullanılarak belirlenmiştir. Nanokil katkılarının ilavesi ile yumuşama noktası değerinin ve viskozitenin arttığı, penetrasyon değerinin ise azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca modifiye asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin nanokompozitin türüne, konsantrasyonuna ve asfalt bağlayıcı içindeki dağılımına bağlı olduğu kaydedilmiştir.

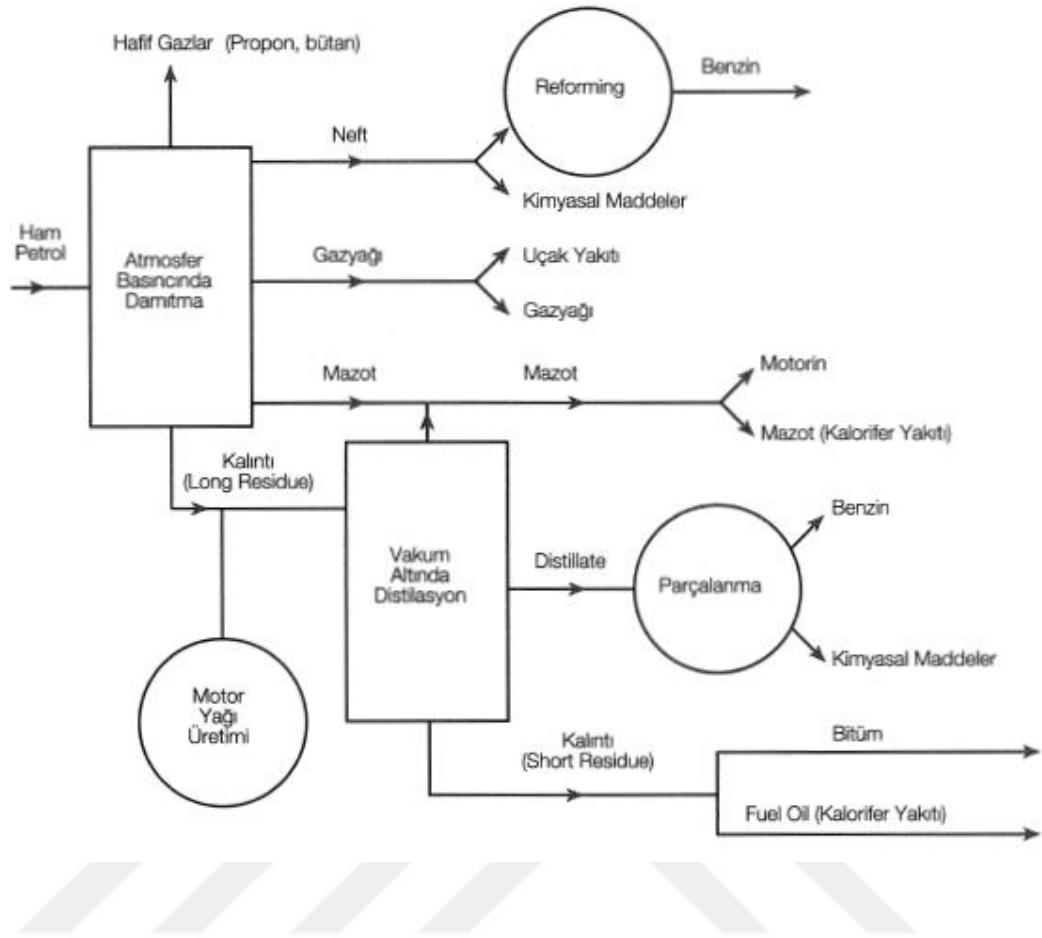
### **1.3 Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol**

Bu çalışmada, ülkemizde üretilen organomontmorillonit nanokilin, asfalt bağlayıcı özelliklerinin iyileştirilmesi için katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu katkı maddesiyle geleneksel asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi, trafik yükleri, iklim, çevresel vb. etkilerden dolayı yol kaplamalarında meydana gelen kalıcı deformasyonların azaltılması ve bakım-onarım maliyetlerinin düşürülmesi esas alınmıştır. Ayrıca bu çalışmadan elde edilecek sonuçların bu alanda çalışma yapan diğer araştırmacılara yardımcı olması amaçlanmıştır.

Literatür özetlerinden anlaşılacağı üzere pek çok araştırmacı tarafından asfalt kaplamaların ömrünü ve performansını iyileştirmek için asfalta nanokil/organokil ilave edilmiştir. Bu katkı maddesi ilavesinin genel olarak asfaltın fiziksel, reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Buradan hareketle organomontmorillonit nanokil katkısı 50/70 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcıyla %2, %4, %6 ve %8 oranlarında 150°C sıcaklıkta, 1 saat süre boyunca 1000 rpm hızında karıştırılarak modifiye asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcı numunelerinin morfolojik yapısı ve modifikasyon mekanizması sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizleri ile belirlenirken; organomontmorillonit nanokilin yapısı X-Işını Kırınımı (XRD) analizi ile tespit edilmiştir. Bununla birlikte katkı maddesinin ve modifiye asfalt bağlayıcıların termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi ile araştırılmıştır. Ayrıca geleneksel asfalt bağlayıcı deneyleri ile numunelerin penetrasyon değerleri, yumuşama noktası sıcaklıkları ve duktilite değerleri incelenmiş olup kısa ve uzun süreli yaşlanmaları RTFOT ve PAV deneyleri ile ortaya konmuştur. Tekerlek izi ve yorulma parametreleri DSR deneyi ile belirlenirken işlenebilirlik ve pompalanabilirlik karakteristikleri RV deneyi ile tespit edilmiştir.

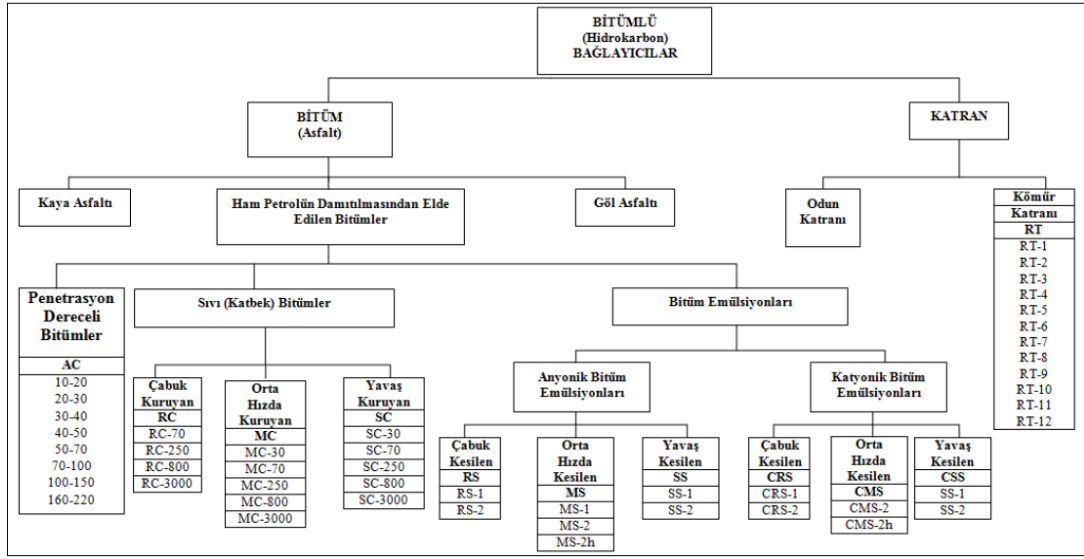
#### **1.4 Bitüm**

Bitüm, siyah veya koyu kahverengi renkli, temel olarak hidrokarbon ve türevlerinden meydana gelen, trikloretilende çözünebilen, kuvvetli yapışma özelliği olan, ham petrolün damıtılmasından elde edilen veya doğal halde bulunan, katı, yarı katı veya sıvı bir bağlayıcıdır (Kaya, 2011) (Şekil 1.1). Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olmak üzere iki kısma ayrılır (Şekil 1.2). Bitkisel kökenli kömürden katranlar, hayvansal kökenli petrolden ise asfaltlar elde edilir. Asfaltlar, doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltları doğal asfaltlardır (Temel, 2016). Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasıyla elde edilir.



Şekil 1.1 Bitüm üretiminin şematik diyagramı (Whiteoak, 2004)





Şekil 1.2 Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Kaya, 2011)

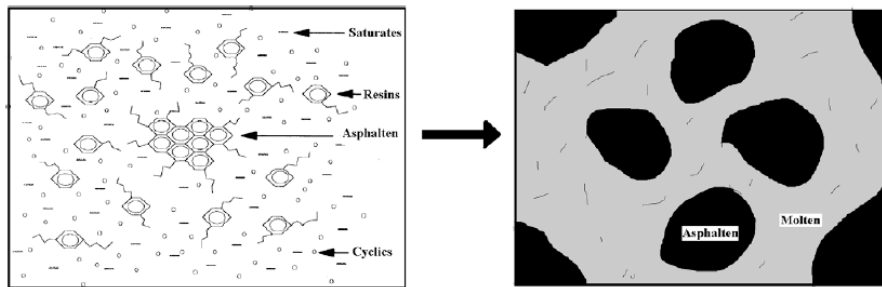
#### 1.4.1 Asfaltın kimyasal yapısı

Asfalt, hidrokarbon moleküller (karbon, hidrojen) ile az miktarda da yapısal olarak benzer nitelikte heterosiklik türler (azot, kükürt, oksijen, nitrojen ve sülfür atomları) içeren fonksiyonel grupların kimyasal bir karışımıdır (Yılmaz, 2016; Uncu, 2017). Asfalt aynı zamanda, eser miktarda inorganik tuzlar ve oksitler şeklinde bulunan kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metalleri de içermektedir (Sağlık, 2009). Farklı ham petrolerden elde edilen asfaltların analiz sonuçları Çizelge 1.1’de gösterilmektedir.

**Çizelge 1.1** Asfaltın kimyasal bileşimi (Whiteoak, 2004)

Bileşenler	Yüzde (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Sülfür	0-6
Oksijen	0-1.5
Nitrojen	0-1

Asfalt, n-heptanda çözünme durumuna göre asfaltenler ve maltenler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Uncu, 2017). Maltenler; doyunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılır (Whiteoak, 2004). Şekil 1.3'te asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri gösterilmektedir.



**Şekil 1.3** Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri (Jahromi ve Khodaii, 2009)

**Asfalttenler:** Karbon ve hidrojenlerden oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen atomu içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi renkli amorf katıdır. Asfaltın toplam %5 - %25'ini oluştururlar (Yılmaz, 2016). Asfalt, asfaltten miktarının artış göstermesi ile daha katı, yüksek yumuşama noktası sıcaklığı ve düşük penetrasyon değerine sahip daha yüksek viskoziteli bir yapı göstermektedir (Uncu, 2016).

**Reçineler:** Büyük oranda hidrojen ve karbon ile az miktarda oksijen, sülfür ve nitrojenlerden oluşan, n-heptan içerisinde çözünen, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katı halde bulunan reçineler elektriksel olarak oldukça yükündür (Sağlık, 2009; Kaya, 2011). Reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını bu özellikleri sağlar (Kaya, 2011).

**Aromatikler:** Asfalt içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı, toplam asfaltın %40 ile %65'ini oluşturan, kahverengi renkli viskoz yağ şeklindeki sıvılardır (Yılmaz, 2016).

**Doymunlar:** Bunlar; saman rengi veya beyaz renkte olan, ortalama molekül ağırlığı aromatiklere benzeyen, hem parafinli hem de parafinsiz bileşenlerden oluşan ve asfaltın toplam %5 ile %20'sini oluşturan polar olmayan viskoz yağlardır (Sağlık, 2009; Kaya, 2011).

#### 1.4.2 Asfaltın reolojisi

Reoloji, malzemelerin sıcaklık ve yüklemenin etkisiyle zaman içerisindeki davranışını inceleyen bilim dalıdır (Kaya, 2011). Asfalt reolojisi ise belirli sıcaklıkta hem kimyasal bileşenlerinin, hem de baskın hidrokarbon yapıların saptanmasını ve bileşenindeki veya yapısındaki değişikliklerin etkisinin incelenmesini içerir (Aksoy, 2002). Asfalt bağlayıcılar değişen sıcaklık ve yük koşullarına bağlı olarak kararlı ve sabit reolojik davranış göstermeyip kısa süreli yükleme durumlarında ya da düşük sıcaklıklarda elastik bir katı gibi, uzun süreli yükleme durumlarında veya yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranırlar (Kaya, 2011; Sağlık vd., 2012). Orta dereceli sıcaklık ve yükleme sürelerinde viskoelastik davranış gösterir (Kaya, 2011). Kaplamalarda, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi, orta sıcaklıklarda yorulma ve düşük sıcaklıklarda ise çatlama meydana gelir (Abdullah, 2016b).

## 1.5 Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Yol kaplamalarında kullanılan asfalt bağlayıcıların özelliklerini belirlemek için birçok deney uygulanmaktadır ve bu deneyleri iki grup altında toplamak mümkündür. Birincisi ülkemiz Karayolu Teknik Şartnamesi'nde yer alan geleneksel bağlayıcı deneyleridir. İkincisi ise yüksek performanslı asfalt kaplama (Superpave) şartnamesinde bulunan performans esaslı bağlayıcı deneyleridir (Yılmaz, 2016). Her iki gruba ait deneyler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Geleneksel bağlayıcı deneyleri
  - Penetrasyon deneyi
  - Yumuşama noktası deneyi
  - Düktilite deneyi
  - Parlama noktası deneyi
  - İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)
  - Trikloretilende çözünürlük deneyi
  - Özgül ağırlık deneyi
  - Fraass kırılma noktası deneyi
- Superpave bağlayıcı deneyleri
  - Dönel viskozimetre deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)
  - Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)
  - Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
  - Basıncılı yaşlandırma kabı deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV)
  - Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)

### 1.5.1 Geleneksel bağlayıcı deneyleri

Bu bölümde, asfalt bağlayıcılara uygulanan geleneksel deney yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

#### 1.5.1.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi, asfalt bağlayıcının sertliğini yani kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (Uncu, 2016). Penetrasyon kelimesi batma veya içine girme anlamına gelmektedir (Kaya, 2011). Standart bir iğnenin bir yük (100 g) altında, 25°C sıcaklıkta

ve belirli bir süre (5 sn) içinde asfalt numunesi içerisine dikey olarak batma miktarıdır (Sağlık, 2009; Uncu, 2017). Penetrasyonun birimi  $10^{-1}\text{mm}$ 'dir. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır (Sağlık, 2009). Yani penetrasyon değeri arttıkça asfalt yumuşar, penetrasyon değeri azaldıkça asfalt sertleşir (Orhan, 2012). Penetrasyon deney aleti ve deneyin yapılış adımları Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4 Penetrasyon deneyi

### 1.5.1.2 Yumuşama noktası deneyi

Asfalt bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını (hangi sıcaklıkta asfaltın akmaya başladığını) belirlemeye yarayan deney yöntemidir (Orhan, 2012). Bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde standart bilyeler (3.5 g ağırlığında) bulunan standart halkalar içindeki asfalt numunesinin  $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$  hızda ısıtılmasıyla yapılır (Sağlık, 2009; Yılmaz, 2016). Isınma sonucu bilyelerin ağırlığıyla beraber yumuşayan asfaltın 2.5 cm altındaki plakaya değdiği andaki sıcaklık değeri termometreden okunur (TSE, 2002). Yumuşama noktası deneyine ait görüntüler Şekil 1.5'te verilmiştir.



**Şekil 1.5** Yumuşama noktası deneyi

Asfalt bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine bağlı olarak hesaplanan Penetrasyon İndeksi (PI) ile tespit edilir (Yılmaz, 2016). PI, Denklem (1.1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}25) - 20 \cdot \text{YN}}{50 \cdot \log(\text{Pen}25) - \text{YN} - 120} \quad (1.1)$$

Yukarıdaki denklemde; (Pen25) asfaltın 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini (dmm) ve (YN) asfaltın yumuşama noktası sıcaklık değerini (°C) göstermektedir.

Asfalt bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri arttıkça PI değerleri azalmaktadır (Alataş ve Kirizgil, 2012).

### 1.5.1.3 Düktilite deneyi

Düktilite, yavaş etkiyen yükler altında asfalt bağlayıcının kopmadan uzama kabiliyetinin bir göstergesi olup belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesidir (Oruç, 1997; Yılmaz, 2016). Düktilite değeri yüksek olan asfaltlar iyi bağlanma kabiliyetine sahiptirler.

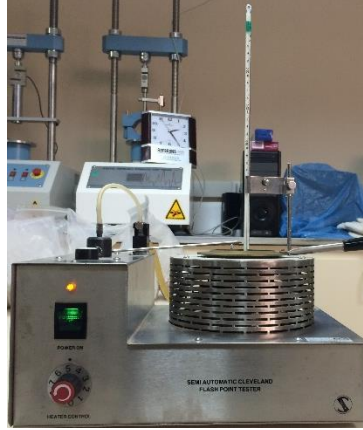
Düktilite cihazı, içi 25°C sıcaklıkta su ile dolu olan ve asfalt bağlayıcı numunesini belirli bir hızda (5cm/dk) yatay olarak çeken özel bir cihaz olup Şekil 1.6'da gösterilmiştir (Atasağun, 2009). Numune briket kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilir ve briket koptuğu anda düktilite cihazının kenarında bulunan cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur (Yılmaz, 2016). Bu cihazla aynı anda üç numune test edilebilmektedir. Üç numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması deneye tabi tutulan asfalt bağlayıcının düktilitesi olarak kabul edilir (TS EN 13398, 2005).



**Şekil 1.6** Düktilite deneyi

#### **1.5.1.4 Parlama noktası deneyi**

Bir maddenin buharının alev temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık parlama noktası olarak tanımlanır (Orhan, 2012). Parlama noktasını belirlemek için Cleveland Açık Kabı metodu kullanılmaktadır (Oruç, 1997). Bu deney, asfalt malzemenin açık bir kaptan ısıtılması sırasında yüzeyinin biraz üzerinde bir kıvılcımın tatbik edilmesi şeklinde gerçekleştirilir (Yılmaz, 2016). Deney aleti Şekil 1.7'de verilmiştir.



**Şekil 1.7** Parlama noktası deney aleti

#### **1.5.1.5 İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)**

İnce film halinde ısıtma deneyi, asfalt tesislerinde agrega ile asfaltın karıştırıldığı sırada meydana gelen yaşlanmayı laboratuvar ortamında belirlemek için yapılır (Çubuk, 2007). Bu deneyde 50 ml asfalt 14 cm çapındaki küçük bir tepsiye doldurulmakta ve bunun sonucunda 3.2 mm kalınlığında bir film tabakasının oluşması sağlanmaktadır (Ahmedzade vd., 2007). Şekil 1.8’de görülen fırında 5-6 devir/dk hızda dönen bir platform üzerine yerleştirilen numuneler 5 saat süreyle 163°C sıcaklıkta bekletilir (Yılmaz, 2016). Bu süre sonunda fırından çıkartılan numuneler tartılır. Yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki ağırlık kaybı 0.01 g hassasiyetli terazi vasıtasıyla belirlenir (TS EN 12607-1, 2003).





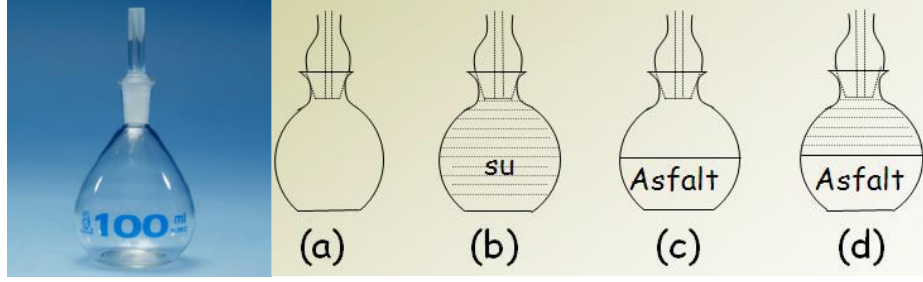
**Şekil 1.8** İnce film halinde ısıtma deneyi

#### **1.5.1.6 Trikloretilende çözünürlük deneyi**

Bu deney, içeriğinde mineral madde bulunmayan ya da çok az bulunan bağlayıcıların trikloretilen, benzen, karbon tetraklorür ve karbon sülfür gibi organik çözücüler içerisindeki çözünürlüğünü tespit etmek için yapılır (Oruç, 1997; Yılmaz, 2016). Asfalt bağlayıcıların trikloretilende en az %99 çözülmesi gerekir (Orhan, 2012).

#### **1.5.1.7 Özgül ağırlık deneyi**

Asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı, 25°C sıcaklıkta hacmi bilinen bir asfalt numunesinin ağırlığının, aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır (Yılmaz, 2016). Asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı piknometre yöntemi ile belirlenmektedir. Deneye piknometrenin cam kapağı ile birlikte tartılması ve tartımın kaydedilmesi ile başlanır (Oruç, 1997). Daha sonra 25°C sıcaklıkta su doldurulan piknometrenin kapağı sıkıca kapatılır ve tekrar tartılır. Ardından piknometre uygun miktarda (piknometrenin yaklaşık yarısına kadar) akışkan hale getirilmiş asfalt bağlayıcı ile doldurulur ve piknometre içindeki numune ile birlikte oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra tartılır. Tartılan piknometre içindeki asfalt numunesinin üzeri damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Sonra sıcaklığı  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 'deki su banyosuna tamamen batırılır ve 30 dakika sonra piknometrenin dışı kurularak tartılır (Yılmaz, 2016). Şekil 1.9'da piknometre deney aleti ve deneyin yapılışı gösterilmiştir. Özgül ağırlık hesabı ise Denklem (1.2)'de verilmiştir.



**Şekil 1.9** Piknometre deney aleti ve deneyin yapılışı (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, 2018)

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} \quad (1.2)$$

Yukarıdaki denklemde; (a) boş piknometre ağırlığını (g), (b) saf su ile dolu piknometre ağırlığını (g), (c) yarısına kadar asfalt bağlayıcı dolu piknometre ağırlığını (g) ve (d) ise asfalt bağlayıcı, saf su ve piknometre ağırlığını (g) göstermektedir.

### 1.5.1.8 Fraass kırılma noktası deneyi

Fraass kırılma noktası, düzgün bir asfalt bağlayıcı filminin belirtilen yük şartları altında kırıldığı sıcaklık (Celcius) olarak tanımlanır (Yılmaz, 2016). Deney, asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıktaki davranışını belirlemek için yapılır. Bu deneyde; 0.5 mm kalınlığında, 41 mm uzunluğunda ve 20 mm genişliğinde asfaltla kaplanmış bir çelik plaka yavaşça bükülür ve serbest bırakılır (Atasağun, 2009). Plakanın sıcaklığı, asfalt kritik sertlik değerine ulaşip çatlama başlancaya dek dakikada 1°C düşürülür (Whiteoak, 2004). İlk çatlamanın oluştuğu sıcaklık, Fraass kırılma noktası olarak belirlenir (TS EN 12593, 2003).

### 1.5.2 Superpave bağlayıcı deneyleri

Superpave sistemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada oluşan kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlaklarını azaltarak bağlayıcı performansını en üst seviyeye çıkarmak ve belirlemek için tasarlanmıştır (Uncu, 2017). Bu şartnamenin en önemli özelliği, deneylerin kaplamanın hizmet

vereceği bölgede maruz kalacağı sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin tespit edilmesine olanak tanınmasıdır (Yılmaz, 2016). Superpave yönteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve parametreleri Çizelge 1.2’de verilmiştir.

**Çizelge 1.2** Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve parametreleri (Yılmaz, 2016)

<b>Deney Adı</b>	<b>Kullanım Amacı</b>	<b>Performans Parametresi</b>
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlak direnci
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT)	BSK (bitümlü sıcak karışım) üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

### 1.5.2.1 Dönel viskozimetre deneyi (Rotational Viscosimeter, RV)

Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcıların hangi sıcaklıkta pompalanabilirlik ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti için akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Arıkan Öztürk ve Çubuk, 2004). Deney sırasında kullanılan AASHTO TP48 standardına uygun olan Brookfield viskozimetresi Şekil 1.10’da verilmiştir. Pompalama ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri

belirlenmektedir (Uncu, 2017). Deney yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılır. Bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenir (Yılmaz, 2016). Dönel viskozimetre değeri, sabit bir sıcaklıkta silindirik bir çubuğun asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile tespit edilir (Kaya, 2011). Bu deney sırasında 30 g civarında bağlayıcı numunesi alınır ve 150°C'den daha düşük sıcaklıktaki etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilir (Yılmaz, 2016). Akışkan hale gelen asfalt numunesinden yaklaşık 11 g silindirik tüpe doldurulur, silindirik tüp sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir, numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra deney yapılır (Alataş ve Kizirgil, 2012).



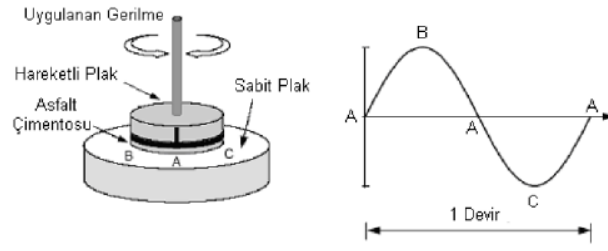
**Şekil 1.10** Brookfield viskozimetre deney aleti

Deney sırasında yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine ulaşıldıktan sonra üç adet okuma yapılmakta ve bu üç değerın ortalamasından, bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir (Uncu, 2017). Viskozite değeri sıcak asfalt karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu amaçla deney, genellikle

135°C ve 165°C sıcaklıklar arasında gerçekleştirilir (Yılmaz, 2016). Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilir (Alataş ve Kizirgil, 2012). Asfalt bağlayıcının agrega ile karıştırılmasında  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırılmasında ise  $280 \pm 30$  cP viskozite değerine sahip olması istenir (Yılmaz, 2016).

#### **1.5.2.2 Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic shear rheometer, DSR)**

Dinamik kayma reometresi deneyi, asfaltın tekerlek izi ve yorulma dirençlerini tespit etmek amacıyla kullanılır (Yılmaz, 2016). Bu deney ile asfalt bağlayıcıların zamana bağlı orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri belirlenir (Orhan, 2012). Asfalt bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini tespit etmek için yaşlandırılmamış ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır (Yılmaz, 2016). Tekerlek izi dayanım parametresini belirlemek için 25 mm çapındaki plakalar ve 1 mm numune kalınlığı kullanılırken, yorulma dayanımını belirlemek amacı ile yapılan deneylerde 8 mm çapındaki plakalar ve 2 mm numune kalınlığı kullanılmaktadır (Uncu, 2017). DSR deneyinde Şekil 1.11’de görüldüğü gibi asfalt bağlayıcı sabit bir plaka ile dönebilen bir plaka arasına yerleştirilir (Kaya, 2011; Yılmaz, 2016). Asfalt bağlayıcı cihaza yerleştirildikten sonra, hareketli üst plaka A noktasından B’ye, B noktasından tekrar A’ya, A noktasından C’ye ve C noktasından tekrar A’ya hareket eder. Bu harekete devir denir ve deney boyunca devam eder. Dönme frekansı yaklaşık olarak 1,59 devir/sn’dir (Yılmaz, 2016). DSR deneyine ait görüntüler Şekil 1.12’de verilmiştir.

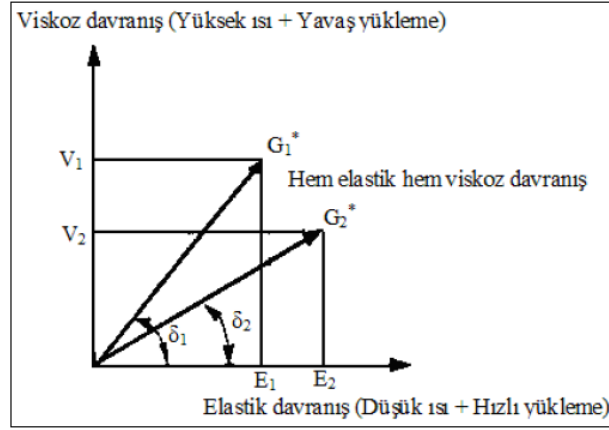


**Şekil 1.11** Dinamik kayma reometresi çalışma şekli (Yılmaz, 2016)



**Şekil 1.12** Dinamik kayma reometresi deney aleti

DSR deneyi, asfalt bağlayıcının viskoz ve elastik davranışını belirlemek amacıyla kompleks kayma modülünü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) ölçmektedir (Orhan, 2012).  $G^*$ , tekrar eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt bağlayıcının gösterdiği toplam direnci ifade etmektedir (Yılmaz, 2016). Faz açısı ise uygulanan kayma gerilmesi ile meydana gelen kayma deformasyonu arasındaki gecikme olup, viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarının göstergesidir (Sağlık, 2009).  $G^*$  ve  $\delta$  değerleri, asfalt bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Yılmaz, 2016) (Şekil 1.13).



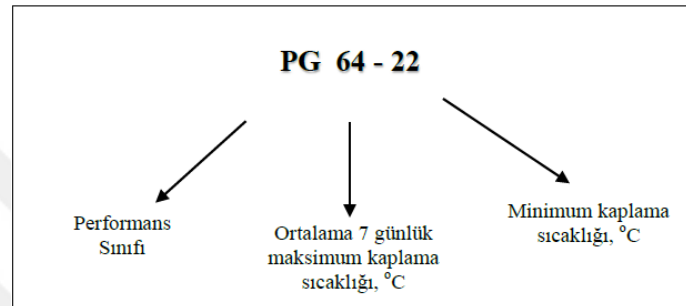
**Şekil 1.13** Asfalt bağlayıcının viskoelastik özelliği (Kaya, 2011)

DSR deneyi sonucunda belirlenen kompleks kayma modülü ve faz açısı kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan  $G^*/\sin\delta$  değeri tespit edilmektedir (Yılmaz, 2016). Bu deney için tekerlek izi oluşumuna ve yorulmaya karşı dayanım şartname sınır değerleri Çizelge 1.3'te görülmektedir.

**Çizelge 1.3** McGennis vd.'e göre DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türüne göre şartname sınır değerleri (Uncu, 2017)

Bağlayıcı Türü	Deneyin Amacı	Şartname Sınır Değerleri
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 1000 Pa
RTFOT ile yaşlandırılmış	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 2200 Pa
PAV ile yaşlandırılmış	Yorulmaya karşı dayanım	Maksimum 5000 kPa

Bağlayıcının performans seviyesi şartnamede (Superpave bağlayıcı şartnamesi) PG X-Y olarak belirtilir (Yılmaz, 2016). Burada X bağlayıcının gerekli performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık sınıfını, Y ise düşük sıcaklık sınıfını belirtmektedir (Kuloğlu vd., 2008). Şekil 1.14'te bir sınıflama örneği görülmektedir.



Şekil 1.14 Superpave performans sınıfı gösterimi (Sağlık vd., 2012)

### 1.5.2.3 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling thin film oven test, RTFOT)

Asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanması, RTFOT deneyi ile laboratuvar ortamında simüle edilir (Yılmaz, 2016). Bu deneyde, ince bir film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıda sıcaklık ve havanın etkisiyle oluşan uçucu maddelerin belirlenmesi ve deneyden sonra yaşlandırılmış asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır (Uncu, 2017).

Deney, Şekil 1.15'te gösterildiği gibi 163°C sıcaklığa sahip bir etüvün dönen tablası üzerine 8 adet şişe içine 35 gram asfalt bağlayıcı numunesi yerleştirilerek düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika boyunca döndürülmesiyle gerçekleştirilir (Kaya, 2011; Yılmaz, 2016). Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000±200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir (Yılmaz, 2016). Sıcaklığın etkisiyle asfalt, şişeleri



tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişini kolaylaştırmaktadır (Uncu, 2017). Bu sürenin sonunda, 2 şişe kütle kaybını tayin etmek için, geri kalan 6 şişe ise asfalt bağlayıcının yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır (Kuloğlu vd., 2008). Kütle kaybı Denklem 1.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}}{\text{İlk Kütle}} \times 100 \quad (1.3)$$



**Şekil 1.15** Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

#### **1.5.2.4 Basıncılı yaşlandırma kabı deneyi (Pressure aging vessel, PAV)**

Bu deney, arazide servis sırasında asfaltta meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuvara yansıtılabilmek amacıyla geliştirilir (Yılmaz, 2016). Deney, RTFOT deneyinden elde edilen asfalt bağlayıcılara uygulanır (Yılmaz,

2011). Böylece kaplamanın inşaat ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneye yansıtılmış olur (Sağlık vd., 2012).

PAV deneyinde AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 g RTFOT deneyinden elde edilen asfalt bağlayıcı konulmaktadır (Yılmaz, 2011). Numunelere, bağlayıcı sınıfına göre 90°C, 100°C veya 110°C sıcaklıkta 2070 kPa'lık (21 bar) basınç 20 saat süreyle uygulanmaktadır (Yılmaz, 2016). Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Çizelge 1.4'te, deneye ait görüntüler ise Şekil 1.16'da verilmiştir.

**Çizelge 1.4** Bağlayıcı sınıfına göre PAV deneyinin uygulanma sıcaklıkları (Yılmaz, 2016)

Bağlayıcı Sınıfı	PAV Deney Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100-110
PG 76-Y	100-110
PG 82-Y	100-110



**Şekil 1.16** PAV deneyi

RTFOT ve PAV deneylerinden elde edilen yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılara DSR ve BBR deneyleri uygulanarak performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir (Yılmaz, 2011).

#### **1.5.2.5 Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending beam rheometer, BBR)**

Kiriş eğme reometresi, soğuk iklimde sahip olan bölgelerde inşa edilecek esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak adlandırılan düşük sıcaklık çatlaklarının belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir (Geçkil, 2008; Yılmaz, 2016) (Şekil 1.17). Deney ile asfalt bağlayıcının, sabit yük altında gösterdiği sünme ve şekil değiştirme özellikleri belirlenir (Atasağun, 2009). Bununla birlikte deney, RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, asfalt bağlayıcının zaman içindeki değişimi de belirlenebilmektedir (Geçkil, 2008).



**Şekil 1.17** Kiriş eğme reometresi deney aleti

Bu deneyde standart ölçüleri 12.5x125x6.25 mm olan kiriş şeklindeki asfalt bağlayıcı numunesi eksi derecelerde donmayan bir sıvı banyosu içinde 980±5 mN tekil kuvvete 240 saniye süreyle maruz bırakılır ve deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır (Kaya, 2011; Yılmaz, 2016). Sünme sertliği, asfalt bağlayıcının sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç; sünme oranı ise yükleme süresi boyunca asfalt bağlayıcının sertliğindeki değişimdir (Geçkil, 2009). Superpave şartnamesine göre 60 saniye sonunda sünme sertliği  $S_{(t)} \leq 300$  MPa ve sünme oranı m-değeri  $\geq 0.300$  olmalıdır (Sağlık vd., 2012).

### 1.6 Asfalt Modifikasyonu

Ham petrol fiyatlarındaki artışlar yüksek maliyetlerin oluşmasına ve böylece daha ince kaplamaların tercih edilmesine sebep olmaktadır. Kaplamalarda artan trafik yüklerinden dolayı deformasyonlar oluşmakta ve hizmet ömrü azalmaktadır. Bundan ötürü asfalt bağlayıcıya ve/veya karışımına katkı maddeleri katılarak asfaltın modifiye edilmesi yönündeki çalışmalar devam etmektedir (Çubuk, 2007). Asfaltın modifiye edilme sebepleri şu şekilde sıralanabilir (Orhan, 2012; Uncu, 2017):

- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak,

- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
- Üretim sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek,
- İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirmek,
- Karışım dayanımını ve stabilitesini artırmak,
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek,
- Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak,
- Yapışmayı iyileştirmek ve asfalt çimentosunun agregaların yüzeyinden soyulmasını azaltmak,
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı bağlayıcının direncini artırmak,
- Kaplamada meydana gelen kusmayı azaltmak,
- Kaplama tabakalarının kalınlığı azaltmak,
- Kaplamanın her bakımdan performansını geliştirmek,
- Kaplamanın ömür-döngü maliyetini azaltmak.

### **1.6.1 Asfalt katkı maddeleri ve katkıli asfaltilarda aranan özellikler**

Modifikasyonlarda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye edilmiş asfaltiların uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması için bazı koşulları sağlaması gerekmektedir (Yılmaz, 2016). Bu koşullar aşağıda sıralanmıştır.

Asfalt katkı maddelerinde aranan özellikler (Geçkil, 2008; Uncu, 2017);

- Kolay elde edilmelidir.
- Ekonomik olmalıdır.
- Asfaltla homojen bir şekilde karışabilmelidir.
- Asfalt, karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir.
- Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılğan ya da sert olmasını önlemelidir.
- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında, asfaltı çok fazla viskoz hale getirmeden akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır.

Katkılı asfaltlarda aranan özellikler (Geçkil, 2008);

- Uygun ekipmanlarla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır.
- Uygulama, hizmet ve depolama sırasında sahip oldukları özellikleri korumalı, fiziksel ve kimyasal olarak stabil kalmalıdır.
- Uygulama sıcaklıklarında püskürtme ve agregayı sarabilme yeteneğine sahip olmalıdır (Ilıcalı vd. 2001; Çubuk, 2007).

### **1.6.2 Asfalt katkı maddelerinin sınıflandırılması**

Asfalt modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Katkı maddelerinin tipini, özelliklerini ve asfalt kıvamına etkilerini gösteren genel sınıflandırma Çizelge 1.5'te verilmiştir.

**Çizelge 1.5** Asfalt katkı maddelerinin sınıflandırılması (İlıcılı vd., 2001; Yılmaz, 2016)

Tip	Örnek Katkı Maddeleri	Asfalt Kıvamına Etkisi	
Filler	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sülfür</li> <li>Karbon siyahı</li> <li>Mineral Filler:</li> <li>Taş tozu</li> <li>Kireç</li> <li>Portland çimentosu</li> <li>Uçucu kül</li> </ul>	Sertleştirme	
Ekstender (Genleştirici)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sülfür</li> <li>Lignin (Odun özü)</li> </ul>	Sertleştirme	
Kauçuk <ul style="list-style-type: none"> <li>Doğal lateks</li> <li>Yapay lateks</li> <li>Blok kopolimer</li> <li>İşlenmiş kauçuk</li> </ul>	POLİMERLER	-	
Plastik		<ul style="list-style-type: none"> <li>Polietilen</li> <li>Polipropilen</li> <li>Polivinil-Klorid (PVC)</li> <li>Etilen-Vinil-Asetat (EVA)</li> </ul>	Sertleştirme
Bileşim		Kauçuk ve plastik gruplarındaki polimerlerin karışımı	-
Fiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğal:</li> <li>Asbest</li> <li>Taş yünü</li> <li>Yapay:</li> <li>Fiberglas</li> <li>Polyester</li> <li>Polipropilen</li> </ul>	Sertleştirme	
Oksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manganez tuzu</li> </ul>	Sertleştirme	
Antioksidan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Karbon</li> <li>Kalsiyum tuzu</li> <li>Kurşun karışımları</li> </ul>	Yumuşatma	
Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sertleştirme ve doğal asfaltlar</li> <li>Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları</li> </ul>	Yumuşatma veya sertleştirme	
Soyulma önleyici	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kireç</li> <li>Aminler</li> </ul>	Yumuşatma	

Polimer ve polimer olmayan şekilde sınıflandırılan katkı maddeleri Çizelge 1.6'da verilmiştir.

**Çizelge 1.6** Polimer ve polimer olmayan katkı maddeleri ve örnekleri (Ilıcalı vd., 2001; Yılmaz, 2016)

Modifikasyon Tipi		Örnekler
1. Polimer modifikasyon		
Plastikler	Termoplastikler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil- Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen-Vinil- Asetat (EVA)
	Termosetler	Epoksi reçine, polyester reçine
Elastomerler	Doğal kauçuklar	
	Yapay elastomerler	Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Stiren-Butadien-Rubber (SBR) İsobüten-İsopren kopolimer (IIR)
İşlenmiş kauçuklar		
Fiberler		Polyester fiberler, Polipropan fiberler
2. Polimer olmayan katkı ile modifikasyon		
Fillerler		Kil, uçucu kül, karbon siyahı
Soyulma önleyici katkıları		Amidler ve organik aminler
Ekstender (Genleştiriciler)		Sülfür, lignin
Antioksidanlar		Aminler, çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, fenolikler
Organo-metal bileşimleri		Organo-manganez bileşimleri
Diğerleri		Organo-karbon bileşimleri
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu		Katkı reaksiyonu (Asfalt+Monomer) Vulkanizasyon (Asfalt+Sülfür) Nitrasyon reaksiyonu (Asfalt+Nitrik asit)

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkileri Çizelge 1.7'de verilmiştir.



**Çizelge 1.7** Yaygın kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi (Ilıcalı vd., 2001; Yılmaz, 2016)

<b>Modifiyer</b>	<b>Modifiyerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi</b>
Ataktik-Polipropilen (APP) Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Sertlik, Penetrasyon, Fraass kırılma noktası, Yumuşama noktası
Balmumu	Viskozite (sıcak), Sertlik (soğuk), Bağlayıcılık, Adezyon
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Fiberler	Tiksotropik, Çatlak direnci, Viskozite
Filler tozu	Yumuşama noktası, Viskozite, Sertlik, Yoğunluk, Maliyet, Mekanik sağlamlık
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon
Solvent	Viskozite
SBS (Stiren-Butadien-Stiren)	Penetrasyon, Yumuşama noktası, Elastik geri dönüş, Düşük sıcaklık kırılma noktası
Yağ	Asfaltın yapısı, Bağlayıcılık, Viskozite, Penetrasyon, Yumuşama noktası

Asfalt karışımlarda kimyasal katkıları da sıklıkla kullanılmaktadır. Asfalt karışımlarda kullanılan kimyasal katkıların olumlu etkileri Çizelge 1.8’de verilmiştir.

**Çizelge 1.8** Asfalt karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri (Büyüksaraçoğlu, 2009)

Kimyasal Katkılar	Kimyasal Katkıların Rolü								
	Yaşlanma	Nem zararı	Agrega bağlayıcı değişikliği	İşlenebilirlik	Adezyon	Stabilite	Tekerlek izi	Soyulma	Sertlik
Hidrate Kil	√	√		√	√	√	√	√	√
Portland Çimentosu				√	√	√	√		
Manganez Modifiyesi			√	√	√		√	√	√
Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	√	√		√	√	√			
Sülfür				√		√	√		√
Organik Polimerler				√		√	√		

√: Olumlu etki

## 1.7 Yapısal Analiz Yöntemleri

Bu bölümde, organomontmorillonit nanokil katkı maddesinin ve/veya asfalt bağlayıcıların kimyasal, morfolojik ve termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan FT-IR, SEM, XRD ve DSC analiz yöntemleri açıklanmıştır.

### 1.7.1 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi, organik veya inorganik katı, sıvı veya gaz numunelerindeki IR-aktif moleküllerin nitel ve nicel özelliklerini belirlemek için kullanılan bir tekniktir (King vd., 2004). Işıma şiddeti, matematiksel Fourier dönüşümü spektroskopisinde zamanın fonksiyonudur (Yılmaz, 2016). Her dalga boyunun ayrı ayrı taranmasına gerek duyulmadan hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilir (Bostancıoğlu, 2012). Bu yöntem, moleküler bağ karakterizasyonu yaparak organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel grupları, iki

bileşimin aynı olup olmadığını, yapıdaki bağların durumunu, bağlanma yerlerini ve yapının aromatik ya da alifatik olup olmadığını belirler (Dokuz Eylül Üniversitesi, 2017).

### **1.7.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)**

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde edilmesi prensibi ile çalışan bir elektron mikroskobu türüdür (Uncu, 2017). Bu yöntemle mikro ve nano boyuttaki malzemelerin yüzeylerinin yüksek büyütme ve çözünürlükte morfolojik, yapısal ve elementel görüntüleri alınabilmektedir. Birçok dalda araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır (Yılmaz, 2016).

### **1.7.3 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)**

DSC cihazı numunenin ısıtılması, soğutulması veya sabit bir sıcaklıkta tutulması ile numunede meydana gelen enerji değişimini ölçer (Bayburt Üniversitesi, 2018). Bu teknikte, referans ile numuneden gelen veya uzaklaşan ısı farkı sıcaklığa veya zamana bağlı olarak gösterilir (Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2018). DSC analizi, başlıca kristallenme ve erime noktasının belirlenmesi, özgül ısı kapasitesi, faz değişim ısı/sıcaklığı ve tepkime ısı/sıcaklığı değişimlerinin ölçümünde kullanılır (Bayburt Üniversitesi, 2018).

### **1.7.4 X-ışını kırınımı yöntemi (XRD)**

X-ışını Kırınımı yöntemi, her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır (Selçuk Üniversitesi, 2018). Bu yöntemle, minerallerin, organik ve inorganik malzemelerin, kristal ve amorf malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilmektedir (Atatürk Üniversitesi, 2018). Biyoloji, fizik, kimya, biyokimya, jeoloji, malzeme ve metalurji, çimento, seramik ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, 2018).

XRD analizi, kil minerallerinin tanımlanmasında ve özelliklerinin saptanmasında kullanılan yöntemlerden biri olmasının yanı sıra organokillerde silikat tabakaları

arasına eklenen yüzey aktif maddelerin incelenmesinde de kullanılmaktadır. Genellikle bakırın veya kobaltın kullanıldığı bir X-ışını jeneratöründen gönderilen ışımının kristal yüzeye çarpması ve belli bir açı ile saçılması sonucu difraksiyonun açısı ve şiddeti saptanarak X-ışını desenleri belirlenmektedir. Difraksiyon açısının yardımıyla tabakalar arası uzaklık Denklem 1.4'teki Bragg Denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1.4)$$

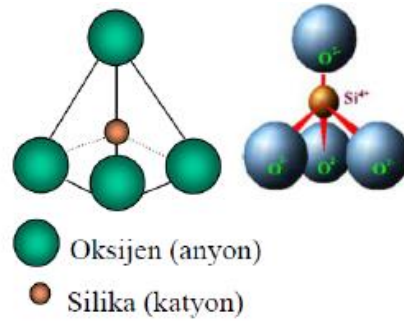
Yukarıdaki denklemde; (n) tamsayı, ( $\lambda$ ) X-ışını dalgasının dalga boyu, (d) tabakalar arası mesafe ve ( $\theta$ ) X ışını ve saçılma düzlemleri arasındaki açığı göstermektedir.

### 1.8 Kil Minerali

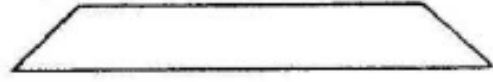
Kil, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir (Önalp, 2007). Dane boyutu iki mikron veya iki mikrondan daha küçüktür. Aynı boyuttaki başka minerallere kıyasla su ile karıştırıldığında çamur oluşturur (Batman, 2015). Pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren bir katıya dönüşür ve ıslakken hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahiptir (Öztürk, 2012). Isıtıldığında genellikle hacim artışı gösterirken, kurutulduğunda ise hacmi azalır ve çatlar (Önalp, 2007).

Killer, tabakalı yapıya sahiptirler. Bu tabakaların kristal yapıları tetrahedral (dört köşeli) ve oktahedral (sekiz köşeli) olmak üzere iki temel birimden oluşmaktadır (Çalıklı, 2008).

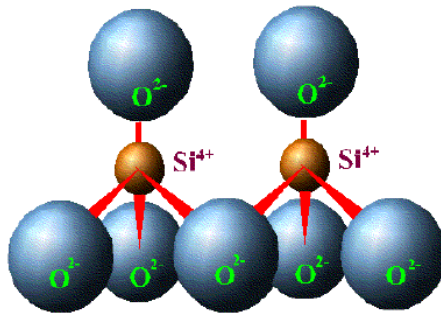
**Tetrahedral Birim (T):** Tetrahedron, merkezinde bir silisyum iyonu bulunan ve bu iyonun dört oksijen iyonuyla çevrilmesiyle oluşmuş düzgün dörtyüzlü şeklidir (Çalıklı, 2008). Şekil 1.18'de silis tetrahedronu ve Şekil 1.19'da silis tetrahedronun basitleştirilmiş hali verilmiştir. Silis tetrahedronların birleşmesi ile oluşan tabakalar tetrahedral tabaka olarak adlandırılır (Batman, 2015) (Şekil 1.20). Tetrahedral tabakadaki baskın katyon  $Si^{4+}$ 'tür ancak sık sık  $Al^{3+}$  ile ve bazen de  $Fe^{3+}$  ile yer değiştirir (Sünnetci, 2015).



Şekil 1.18 Silis tetrahedronu (Karabük Üniversitesi, 2018)

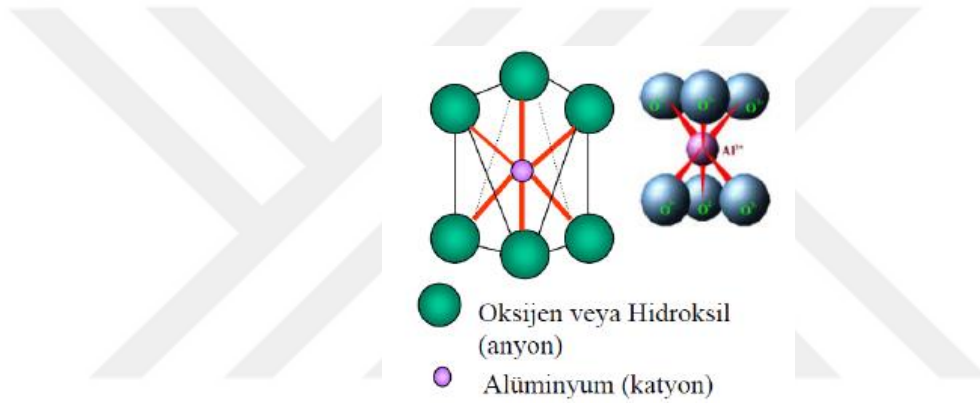


Şekil 1.19 Silis tetrahedronunun basitleştirilmiş hali (Öztürk, 2012)

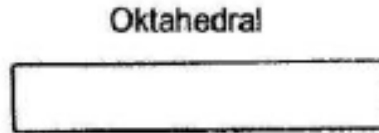


Şekil 1.20 Tetrahedral tabaka (Çalıklı, 2008)

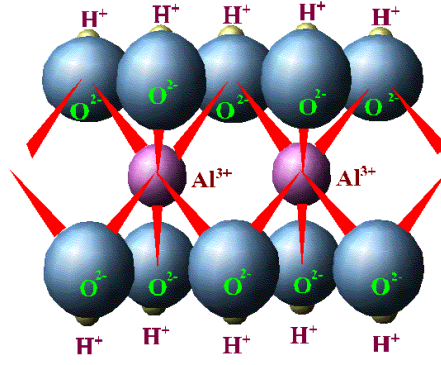
**Oktahedral Birim (O):** Oktahedron, merkezinde bir alüminyum veya magnezyum iyonu bulunan ve bu iyonun altı oksijen veya hidroksil iyonu ile çevrilmesiyle oluşmuş düzgün sekizyüzlü şeklidir (Çalıklı, 2008; Batman, 2015). Şekil 1.21’de alüminyum veya magnezyum oktahedronu ve Şekil 1.22’de alüminyum veya magnezyum oktahedronunun basitleştirilmiş hali verilmiştir. Oktahedronların birleşmesi ile oluşan tabakalar ise oktahedral tabaka olarak adlandırılır (Batman, 2015) (Şekil 1.23). Oktahedron tabakadaki katyonlar genellikle  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  veya  $Fe^{3+}$  ve bazen  $Li^{+}$  şeklindedir (Sünneci, 2015).



**Şekil 1.21** Alüminyum veya magnezyum oktahedronu (Karabük Üniversitesi, 2018)



**Şekil 1.22** Alüminyum veya magnezyum oktahedronunun basitleştirilmiş hali (Öztürk, 2012)



Şekil 1.23 Oktahedral tabaka (Çalıklı, 2008)

### 1.8.1 Kil minerallerinin sınıflandırılması

Killer, çoğu zaman saf halde bulunmayıp değişik elementler ve mineraller içerirler ve çok farklı kristal şekillerine sahiptirler (Sünnetci, 2015). Bu nedenlerden dolayı killer birçok şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar genelde aşağıda verildiği gibidir (Malayoğlu ve Akar, 1995):

- Mineralojik özelliklerine göre sınıflandırma
  - Kaolin grubu
  - Smektit (Montmorillonit) grubu
  - Mika grubu
  - İllit grubu
  - Attapulgit grubu
- Yapılarına göre sınıflandırma
  - Amorf grup
  - Kristal grup
- Kimyasal içeriklerine göre sınıflandırma
  - Yüksek alüminyum içerikli
  - Boksit içerikli
  - Silikat içerikli
  - Demir içerikli
  - Kalsit içerikli

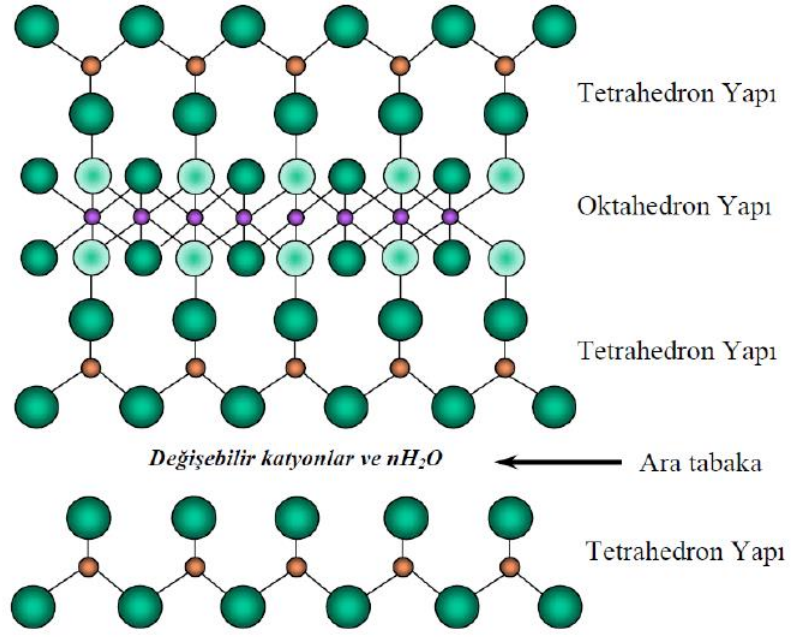
Karbonat içerikli

- Fiziksel özelliklerine göre sınıflandırma
  - Plastik özelliğine göre
  - Tane boyutuna göre
  - Refrakter özelliğine göre
  - Renk özelliğine göre
- Üretildikleri yatak veya bölgeye göre sınıflandırma
- Kullanım alanlarına göre sınıflandırma

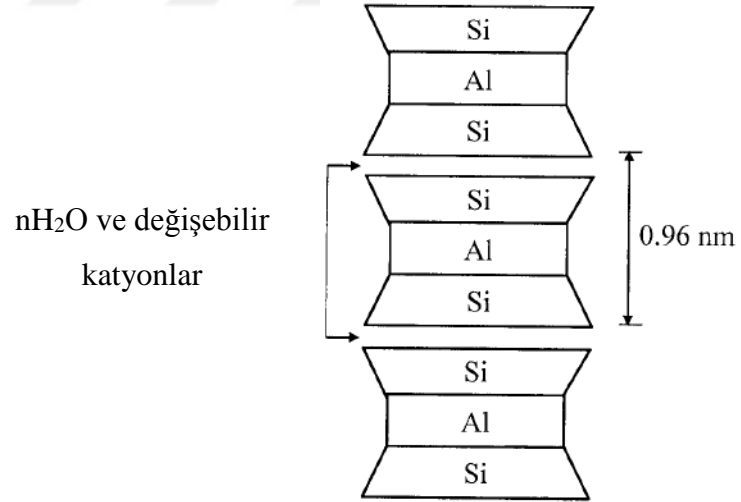
Çalışmada kullanılan kil minerali montmorillonit olarak seçildiğinden aşağıda montmorillonitin genel özellikleri detaylı biçimde verilmiştir.

**Montmorillonit Grubu:** İlk olarak 1847 yılında Fransa'nın Montmorillon bölgesinde Damour ve Salvevat tarafından bulunmuştur (Çalıklı, 2008; Koç, 2011). Bu sebeple montmorillonit adı bu bölgeden gelmektedir. Montmorillonitin kristal yapısı 2:1 (TOT) şeklinde olup iki silisyum tetrahedral tabakası arasında bulunan bir alüminyum oktahedral tabakasından meydana gelmektedir. Bu tabakalar birbirlerine iyonik bağlar ile her bir birim hücre ise birbirlerine zayıf Van der Waals bağlarıyla bağlıdırlar (Binat, 2016). Montmorillonitin tabaka yapısı ve bu yapının şematik diyagramı sırasıyla Şekil 1.24 ve Şekil 1.25'te verilmiş olup SEM görüntüsü Şekil 1.26'da gösterilmiştir. Kimyasal formülü  $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$  şeklindedir (Çalıklı, 2008).

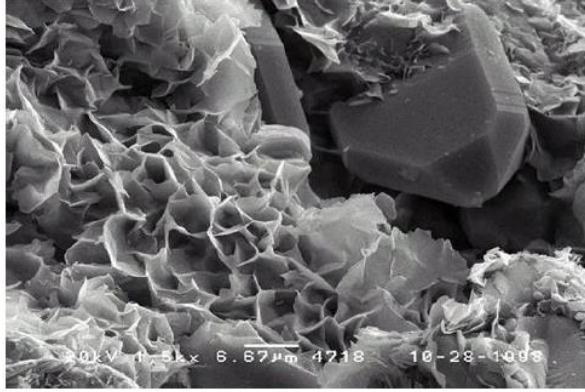




Şekil 1.24 Montmorillonitin tabaka yapısı (Karabük Üniversitesi, 2018)



Şekil 1.25 Montmorillonitin tabaka yapısının şematik diyagramı (Angın ve Angın, 2005)



**Şekil 1.26** Montmorillonitin SEM görüntüsü (Mineralogy Database, 2018)

Montmorillonitin bazı temel özellikleri şunlardır:

**Şişme Özelliği:** Köroğlu'na (2004) göre kilin yapısına su girdiğinde hacminin artmasıdır (Çalıklı, 2008). Montmorillonit yaklaşık olarak kendi kütlelerinin beş katı kadar suyu adsorbe edebilir. Adsorbe ettiği bu suyu 100-150°C gibi düşük sıcaklıklarda kaybeder (Erten Kanat, 2013).

**Plastiklik Özelliği:** Kilin içerisindeki su miktarı değişimine bağlı olarak kazandığı özelliktir. Kildeki su miktarının azalması kilin katılaşmasına neden olurken su miktarının artması kile akıcılık özelliği kazandırır (Erten Kanat, 2013). Montmorillonitin plastisitesi yüksektir.

**Renk:** Rengi beyaz, gri, yeşil, sarı, pembe, mor veya kırmızı olabilmektedir (Alp, 2012).

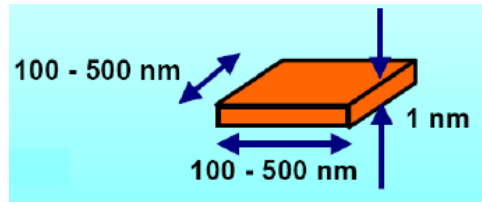
**Reolojik Özelliği:** Killer, kilin su içeriği ile değişen akma noktası, akış tipi ve viskozite gibi reolojik özelliklere sahiptir (Erten Kanat, 2013). Montmorillonitin tiksotropik özelliği (görünür viskozitenin belli bir kayma hızında zamanla değişmesi) suyla temasa geçtikten sonra jel, çalkalandıktan sonra ise sıvı hale gelebilmesidir (Binat, 2016).

**Adsorplama Özelliği:** Köroğlu'na (2004) göre montmorillonit yaklaşık 800 m<sup>2</sup>/g değerle çok yüksek yüzey alanına sahiptir (Çalıklı, 2008). Bu nedenle diğerkil minerallerine göre daha yüksek miktarlarda madde adsorplayabilir.

**Katyon Değişim Kapasitesi:** Mineralin kristal yapısı değışmeksizin, tetrahedral veya oktahedral levhadaki katyonların, ortamda bulunan aynı veya farklı değeriğe sahip başka katyonlarla yer değıştirmesi izomorf değışim olarak adlandırılır. İzomorf değışim sonucunda, kil kristallerinde net negatif yük durumu ortaya çıkar. Ortamda bulunan katyonlar, negatif yükün dengelenerek elektriksel nötrlüğün sağlanabilmesi için kil tanesine çekilir. Kil tanesinin köşe ve yüzeylerine bağlanan bu katyonlar, değışebilir katyonlardır. Killerde yaygın değışebilir katyon türleri; H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> ve Mg<sup>2+</sup> olarak sıralanabilir. Katyon değıştirme kapasitesi (CEC) ise bir kilin yük eksikliğini dengelemek için gereken değışebilir katyonların toplam miktarıdır (Öztürk, 2012).

Köroğlu'na (2004) göre bu değışim miktarı, 100 gramlık örnekte yer değıştirebilen katyonların milieşdeğer miktarı olarak tanımlanır ve birimi meq/100 g'dır (Çalıklı, 2008). Montmorillonitin katyon değıştirme kapasitesi 80-150 meq/100 g'dır.

**Boyut:** Montmorillonit tabakasının uzunluğu ve genişliğı 100 nm ile 500 nm arasında değışmektedir, fakat kalınlığı 1 nm'dir (Çalıklı, 2008) (Şekil 1.27). Bu yüzden montmorillonit nanomadde sınıfına girmektedir. Çünkü nanomadde 1-100 nm arasında en az bir boyuta sahip malzeme olarak tanımlanır (Li vd.,2017).



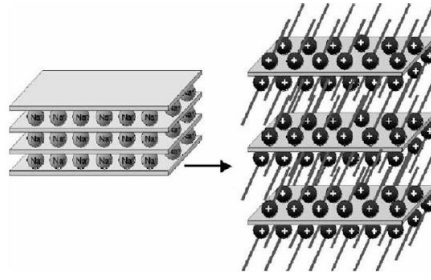
**Şekil 1.27** Montmorillonit tabakasının boyutları (Çalıklı, 2008)

Türkiye’de en çok Ordu, Tokat, Artvin, Ankara ve Edirne’de bulunan montmorillonitler; yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve su ile kolayca plastik özellik alabilmesi, taneciklerinin elektrik yüklü olması, sıvı emme kabiliyetleri, kolloidal yapıları, tanecik boyutunun oldukça küçük ve yüzey alanının geniş olması ve şişme özellikleri sayesinde endüstride oldukça yaygın bir kullanıma sahiptirler (Alp, 2012; Binat, 2016). Kullanım alanları aşağıda verilmiştir (Binat, 2016):

- Su sertliğinin giderilmesinde,
- Su geçirmez malzeme üretiminde,
- Boya, emaye, ilaç ve kimya endüstrisinin çeşitli kollarında,
- Çimento ve sıvalarda,
- Yol, kanal ve baraj yapımında,
- Seramikte,
- Sondaj çamurlarında,
- Sıvı, katı ve madeni yağların ağartılmalarında,
- Petrol sondaj borularında,
- Şarap, sirke ve meyve suları gibi içeceklerin bulanıklığının giderilmesinde,
- Yangın söndürücülerde kullanılırlar.

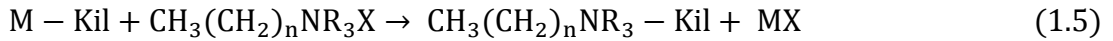
### 1.9 Organokil

Kil mineralleri üzerine yapılan incelemeler doğal yaygınlığı, düşük maliyeti, tehlikeli olmayan yapısı ve reaktivitesinden dolayı büyük ilgi görmektedir (Bibi vd., 2016). Kil minerallerinin yüzey modifikasyonu, özellikle yeni malzemeler ve yeni uygulamaların oluşturulmasını sağladığı için son yıllarda dikkat çekmektedir (de Paiva vd., 2008). Organokiller, killerin organik yapılar olan yüzey aktif maddeler ile muamele edilmesiyle meydana gelmektedirler (Binat, 2016). Şekil 1.28’de nanokil malzemesinin yüzey işlemi verilmiştir. Kil mineralleri arasında simektitler, özellikle montmorillonit; büyük özgül yüzey alanı, şişme davranışı, adsorpsiyon özellikleri, yüksek katyon değiştirme kapasitesi, katmalı yapısı ve kimyasal ve mekanik stabilitesi gibi üstün özelliklerinden dolayı yaygın bir şekilde organokil hazırlamak için kullanılır (de Paiva vd., 2008; Binat, 2016).



**Şekil 1.28** Nanokilin yüzey işlemi (Jahromi ve Khodaii, 2009)

Değiştirme merkezlerindeki inorganik katyonların hidrasyonu nedeniyle kil mineral yüzeyi hidrofilik (suyu seven) olduğundan doğal killer organik bileşikler için etkisiz adsorbentlerdir (Erten Kanat, 2013). Killerin, organik maddelere olan ilgisini artırmak amacıyla organik modifiyerlerle modifiye edilmeleri gerekmektedir. Killerin organokillere dönüşmeleri, basit bir yer değiştirme tepkimesi sonrasında gerçekleşir. Teknik olarak bu süreç, kil tabakaları arasında bulunan katyonlar ile çözeltide bulunan kuaterner amonyum katyonlarının iyon değişimidir (de Paiva vd., 2008). Tepkime işlemi Denklem 1.5'te verilmiştir. (Jahromi ve Khodaii, 2009):



Yukarıdaki denklemde; R = -H, -CH<sub>3</sub>; X = -Cl, -Br, -I; M = Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> olarak tanımlanmaktadır.

Tepkimede kullanılacak yüzey aktif madde miktarı Katyon değiştirme kapasitesi ile belirlenir (Çalıklı, 2008). Büyük organik moleküllerin sodyum ve kalsiyum katyonları yerine yüzeylere tutunması sonucu tabakalar arası uzaklık artar (Çalıklı, 2008). Kil disklerinin birbirinden ayrılması, büyük aktif yüzey alanına sahip bir nanokil ile sonuçlanır (Yang ve Tighe, 2013). Bu, nanokil ile çevresi (bu çalışmada asfalt bağlayıcı) arasında yoğun bir etkileşime sahip olmaya yardımcı olur (Jahromi ve Khodaii, 2009).

Organokilleri normal killerden ayıran iki temel özellik, tabakalar arası uzaklığın yüksek olması ve organofilik davranışdır (Çalimli, 2008).

Organokiller;

- polimer nanokompozitleri geliştirmede,
- toprak, su ve havadaki kirleticiler için adsorbent olarak,
- boyalarda,
- kozmetikte,
- refrakter vernikte,
- tiksotropik sıvılarda,
- reolojik kontrol maddelerinde,
- ileri malzemelerin hazırlanmasında (optik, elektronik, nanokompozitler),
- atıksu arıtmada,
- petrol aramalarında,
- yemeklik yağların ağartılmasında,
- içeceklerin berraklaştırılmasında adsorplayıcı olarak kullanılmaktadırlar (Murray, 1991; Lee ve Kim, 2002; de Paiva vd., 2008; Zampori vd.; 2010).

## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada, Tüpraş İzmit Rafinerisinden temin edilen ve sıcak asfalt karışımlarda kullanılan B50/70 penetrayon dereceli asfalt kullanılmış olup fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Katkı maddesi olarak kullanılan nanokil (ENTAR 461) Entekno Endüstriyel Teknolojik ve Nano Malzemeler San. ve Tic. A. Ş.’den temin edilmiş olup malzeme ve özellikleri sırasıyla Şekil 2.1 ve Çizelge 2.2’de verilmiştir.



**Şekil 2.1** Organomontmorillonit nanokil görüntüsü

**Çizelge 2.1** Orijinal asfalta ait fiziksel özellikler

Deney	Standart	Değer
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	57
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	50
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113	100+
Özgül Ağırlık (25°C), g/cm <sup>3</sup>	ASTM D70	1.022
Fraass Kırılma Noktası, °C	IP80	-10
Trikloretilende Çözünürlük, %	EN 12592	99.9
Parlama Noktası, °C	ASTM 92	248
Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonrası		
Penetrasyon (100g, 25°C, 5sn), dmm	ASTM D5	29
Kalıcı Penetrasyon (%)	ASTM D5	50.88
Yumuşama Noktası, °C	ASTM D36	56.2
Düktilite (25°C, 5cm/dk), cm	ASTM D113	100+
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0.06



**Çizelge 2.2** Nanokilin özellikleri

Muamele/Özellikler	ENTAR 461
Esas	Montmorillonit
Organik modifiyer	Hexadecyltrimethyl ammonium bromide
Dane Boyutu	$\leq 8 \mu\text{m}$ (d50)
Temas Açısı	$80^\circ \pm 2$
Yoğunluk	$1.85 \text{ g/cm}^3$

### 2.1 Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Hazırlanması

B50/70 penetrasyon sınıfı orijinal asfalt bağlayıcı  $150^\circ\text{C}$  sıcaklığa kadar etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Aynı sıcaklığa ayarlanmış karıştırma kabının içerisine 200 g asfalt bağlayıcı dökülerek, asfalt ağırlığının %2, %4, %6 ve %8 oranlarında organomontmorillonit nanokil (NC) katkı maddesi ayrı ayrı ilave edilmiştir. Katkı ve asfalt,  $150^\circ\text{C}$  sıcaklıkta, 1000 rpm hızda, 1 saat süre boyunca mekanik dört kollu karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak modifiye asfalt bağlayıcılar üretilmiştir (Şekil 2.2).



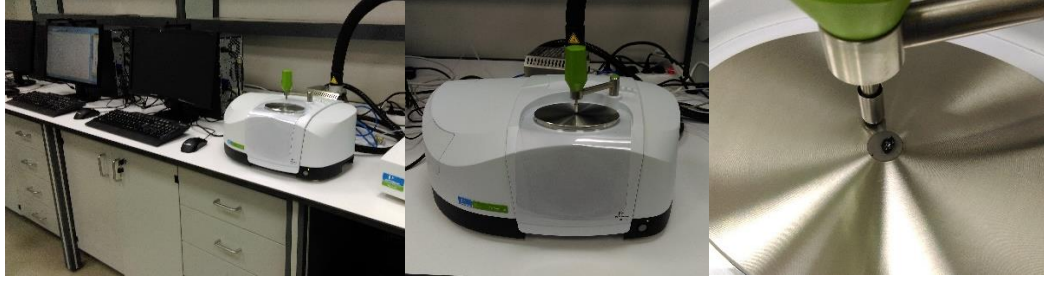
**Şekil 2.2** Modifiye asfalt bağlayıcıların hazırlanması

## **2.2 Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi**

Katkı maddesi ilavesiyle orijinal asfalt bağlayıcının yapısındaki kimyasal değişimler, FT-IR analizi ile termal özellikleri ise DSC analizi ile ortaya konulmuştur. Katkı maddesinin, asfalt içerisinde homojen olarak dağılımının gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek ve katkı maddesi ile asfalt bağlayıcı arasındaki morfolojik yapıyı tespit etmek için SEM analizi yapılmıştır. Katkı maddesinin yapısı XRD analizi ile tespit edilmiştir. Tüm bu analizler Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

### **2.2.1 FT-IR analizi**

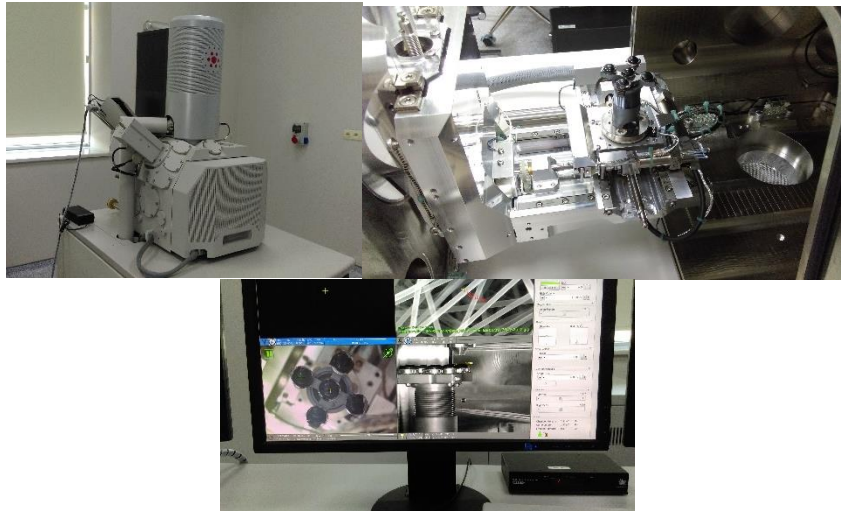
Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların kimyasal yapı karakterizasyonu Perkin Elmer UATR Two marka FT-IR spektrometresi ile incelenmiştir. 1-2 mg asfalt numunesi cihazın numune tablasının üzerine yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında ölçüm yapılmıştır (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3** FT-IR cihazı ve analiz aşamaları

### 2.2.2 SEM analizi

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların morfolojik yapısı FEI Nova Nano SEM 450 marka SEM cihazı ile belirlenmiştir. Bağlayıcılar, iletken karbon bant üzerine konulmuş ve SEM cihazının numune bölmesine yerleştirilmiştir. Cihaz ayarları 1 kV güç ve 1000 büyütme oranına ayarlanarak SEM fotoğraları elde edilmiştir (Şekil 2.4).



**Şekil 2.4** SEM cihazı ve iletken karbon bant üzerindeki asfalt bağlayıcı numuneleri

### 2.2.3 DSC analizi

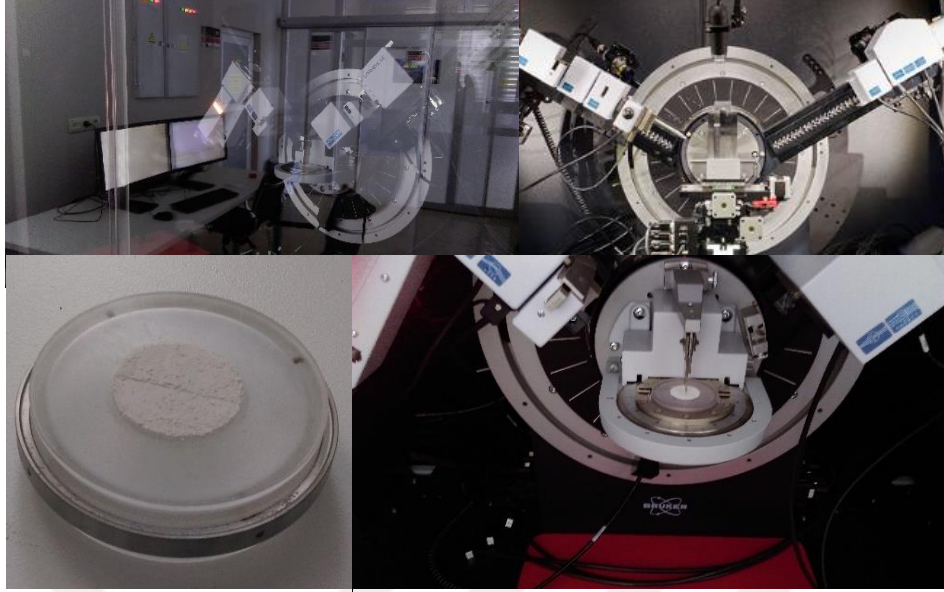
Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların termal özellikleri Perkin Elmer DSC 8000 marka cihaz ile belirlenmiştir (Şekil 2.5). Asfalt bağlayıcılardan 3-4 mg alınarak platinyum pota içerisinde konulmuştur. Hazne içerisindeki inert çevreyi korumak için 10 mL/dk akış hızına sahip kuru hava kullanılmıştır. Isıtma hızı 10°C/dk ayarlanarak numunelerin sıcaklığı 0°C sıcaklıktan 200°C sıcaklığa çıkarılmıştır.



Şekil 2.5 DSC cihazı ve analizde kullanılan numuneler

### 2.2.4 XRD analizi

Organomontmorillonit nanokilin yapısı BRUKER D8 DISCOVER XRD marka cihaz ile Cu-K $\alpha$  radyasyon kullanılarak ( $\lambda=1.5418\text{\AA}$ ,  $K\alpha=0.5$ , Voltage=40kV) incelenmiştir. Organomontmorillonit nanokilin tabakalar arası mesafesi Denklem 1.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 2.6'da ise XRD analiz cihazı ve analiz görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 2.6** XRD analiz cihazı ve analizde kullanılan organomontmorillonit nanokil numunesi

### 2.3 Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri yapılmıştır. Reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla DSR, RV, RTFOT ve PAV deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yaşlandırılmamış asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı DSR deneyi ile belirlenmiştir. Bohlin DSR II reometre cihazı kullanılarak 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda asfalt bağlayıcılara ait kompleks kayma modülü ( $G^*$ , Pa), faz açısı ( $\delta$ ) ve tekerlek izi dayanım parametresi ( $G^*/\sin \delta$ , Pa) değerleri bulunmuştur. Deneyde, 25 mm çapında paralel plakalar kullanılmış olup plakalar arası boşluk 1 mm olarak ayarlanmıştır. Numunelere, kontrollü gerilme altında 120 Pa sabit gerilme 1.59 Hz frekansta uygulanmıştır.

Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristikleri RV deneyi ile belirlenmiştir. Brookfield DV2T marka dönel viskozimetre cihazı kullanılarak 80°C,

90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C ve 180°C sıcaklıklarda numunelerin viskozite değerleri bulunmuştur. Numunelerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek 170±20 cP ve 280±30 cP değerlerine karşılık gelen sıcak asfalt karışımlardaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmıştır.

Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlanma özellikleri RTFOT deneyi ile belirlenmiştir. Yaşlandırma sonrasında bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve RV deneyleri uygulanarak bağlayıcıların yaşlanma sonrası özellikleri tespit edilmiştir. Uzun süreli yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi için RTFOT deneyinden elde edilen numunelere PAV deneyi yapılmıştır. PAV deneyi, 100°C sıcaklıkta, 21 bar basınç altında 20 saat bekleme süresinde geręekleřtirilmiřtir. Deney sonunda numuneler, içerisinde biriken gazdan arındırılmak üzere 170°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle yüksek vakum altına alınmıştır. Bu işlemden sonra numuneler DSR deneyi için hazır hale getirilmiştir. Numunelerin yorulma dirençlerinin ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) belirlenmesi için DSR deneyi, 25°C ve 28°C sıcaklıklarda yapılmıştır. DSR deneyi, 8 mm çapındaki paralel plakalar ve plakalar arası boşluk 2 mm ayarlanarak geręekleřtirilmiřtir.

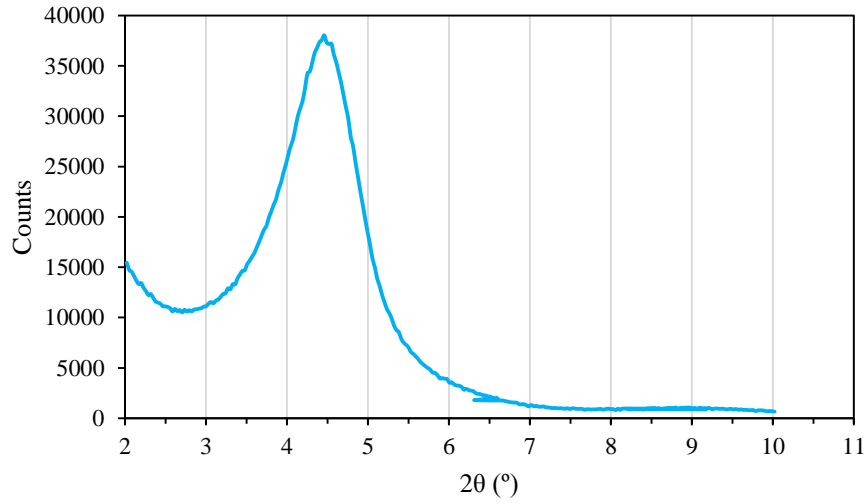
### 3. BULGULAR ve İRDELEME

Bu bölümde, katkı maddesinin yapı analizine ilişkin bulgular, çeşitli değişkenlere göre orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara uygulanan performans deneylerinden elde edilen bulgular ile grafikleri verilmiştir. Ayrıca bu grafikler doğrultusunda deney sonuçlarına ilişkin irdeleme ve değerlendirmeler yapılmıştır.

#### 3.1 Katkı Maddesinin Yapısal Analiz Sonuçları

##### 3.1.1 XRD analiz sonuçları

Organomontmorillonit nanokilin XRD deseni Şekil 3.1’de verilmiştir.



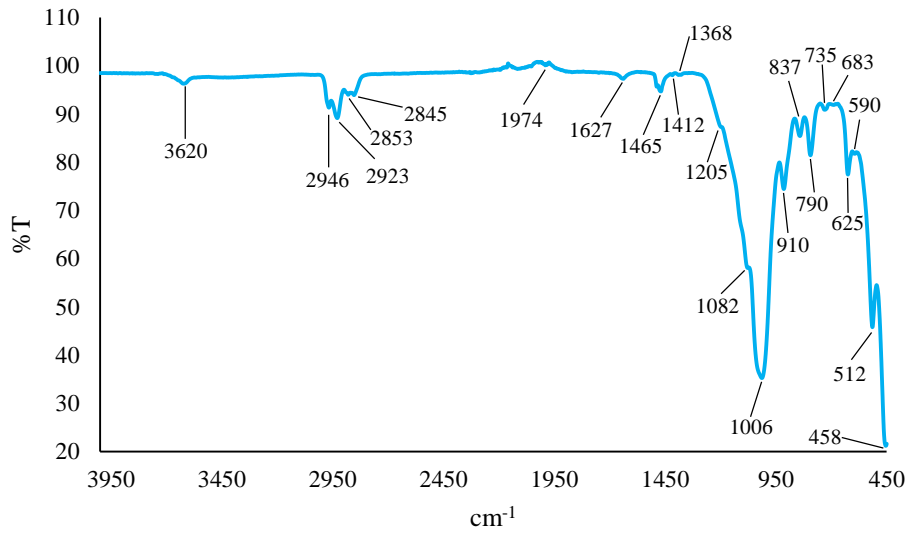
Şekil 3.1 Organomontmorillonit nanokile ait XRD deseni

Şekil 3.1’de görüleceği üzere, organomontmorillonit nanokilin XRD deseninden  $2\theta = 4.47^\circ$  bulunmuştur. Buradan  $\theta = 2.235^\circ$  hesaplanmıştır. Bragg denkleminde  $\lambda = 1.5418\text{\AA}$  ve  $n=1$  alınarak tabakalar arası uzaklık  $d = 19.77\text{\AA}$  olarak bulunmuştur.

Ham montmorillonitin kuaterner (teta alkil) tuzu ile modifiye edilmesiyle tabakalar arası uzaklık 14Å'dan 19.77Å'a yükselmiştir.

### 3.1.2 FT-IR analiz sonuçları

Katkı maddesinin yapısal analizini ortaya koyan FT-IR spektrumu Şekil 3.2'de değerlendirmesiyle birlikte sunulmuştur.



Şekil 3.2 Organomontmorillonit nanokilin FT-IR spektrumu

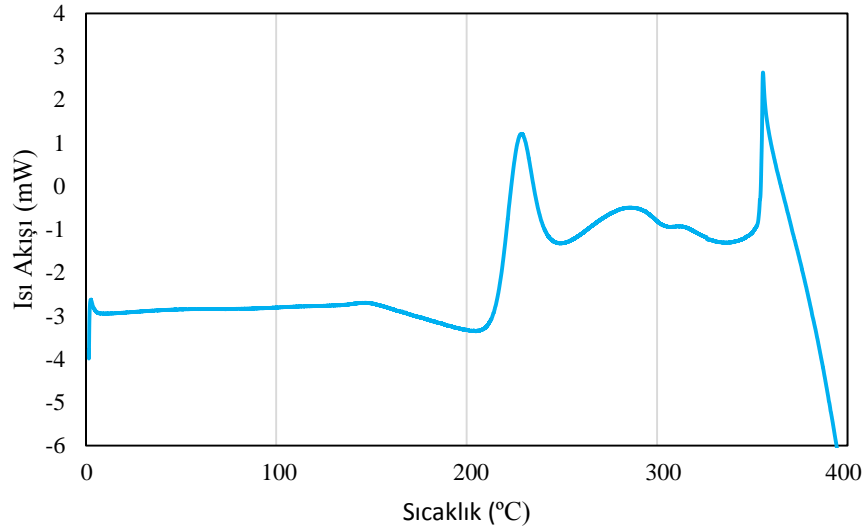
Teta alkil amonyum tuzu ile modifiye edilen montmorillonit katkısının IR spektrumunda montmorillonitin yapısında var olan OH bandının uzantısı 3620  $\text{cm}^{-1}$ 'de su piki olarak (OH gerilim) gözlenmektedir. Yine içerdiği alkil zincirine ait C-H gerilim bantları; 2946, 2923, 2853 ve 2845  $\text{cm}^{-1}$ 'de ortaya çıkmaktadır.  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  gruplarına ait deformasyon bantları zayıf bantlar niteliğinde 1465 ve 1368  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülmektedir. Diğer yandan montmorillonit kilinin yapısında, katkının yapısında var olan OH-gruplarının Al-OH şeklindeki bağlantısı OH bağ gerilimi olarak 910  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenmektedir. Aynı Al-Mg-OH bağına ilişkin ilave gerilim (deformasyon) 837



$\text{cm}^{-1}$  görülmektedir. Katkının en önemli bandı olarak gözlenen C-O bağına ilişkin gerilme titreşiminin  $1006$  ve  $1082 \text{ cm}^{-1}$ 'de ortaya çıktığı gözlenmektedir.

### 3.1.3 DSC analiz sonuçları

Katkı maddesine ait termal analiz (DSC) eğrisi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



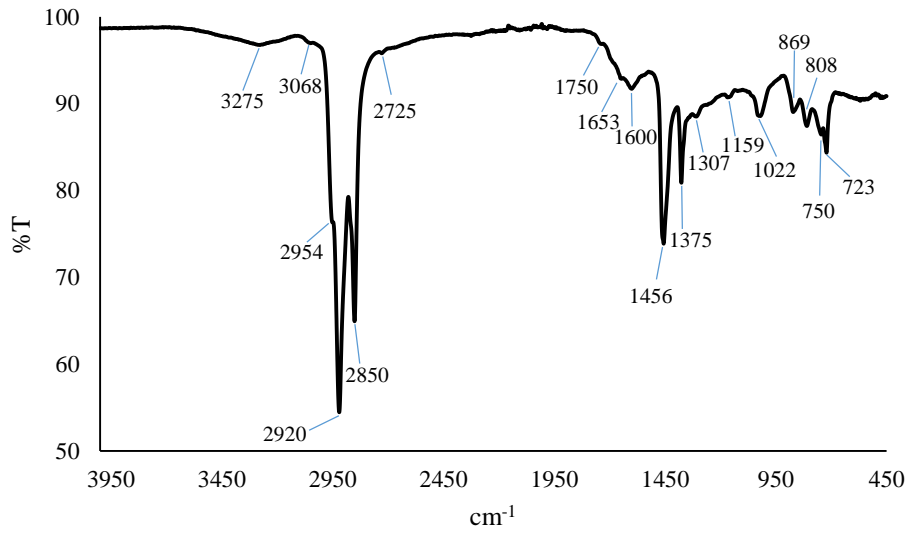
**Şekil 3.3** Katkı maddesinin DSC eğrisi

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere nanokil,  $75^\circ\text{C}$  civarındaki sıcaklıkta camsı geçiş sıcaklığına sahiptir.  $205^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki pik nanokilin kristalleşme noktasına karşılık gelir ve bu sıcaklık ekzotermik süreci ifade eder.  $230^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki pik nanokilin erime noktasına karşılık gelir ve erime süreci endotermiktir.  $285^\circ\text{C}$  ve  $317^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda sırasıyla çapraz bağlanma ve oksidasyon süreçleri var ve bu süreçler endotermiktir. Son olarak  $356^\circ\text{C}$  sıcaklıkta nanokilde bozunma gerçekleşmiş ve bu süreç endotermiktir.

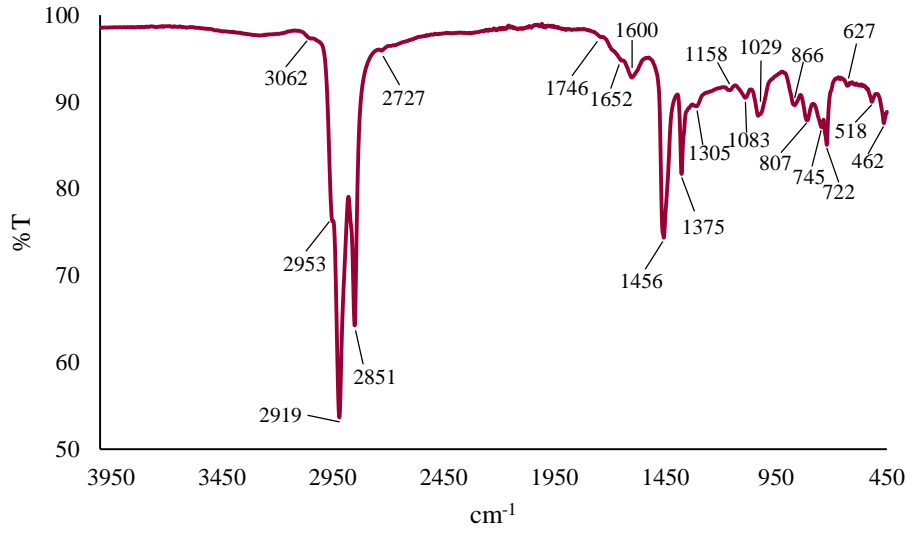
## 3.2 Orijinal ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Analiz Sonuçları

### 3.2.1 FT-IR analiz sonuçları

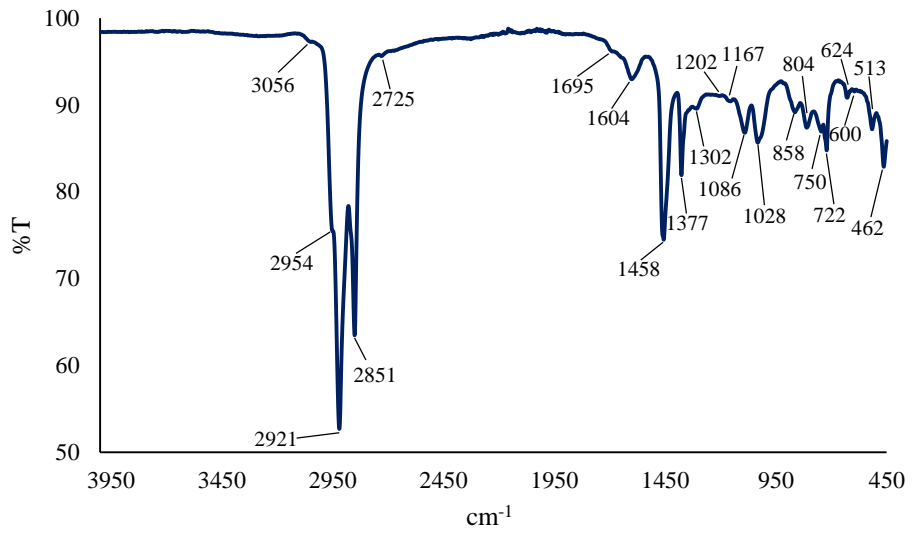
Çalışmada kullanılan %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarındaki katkı ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı numunelerine ilişkin FT-IR spektrumları Şekil 3.4-3.9'da verilmiştir.



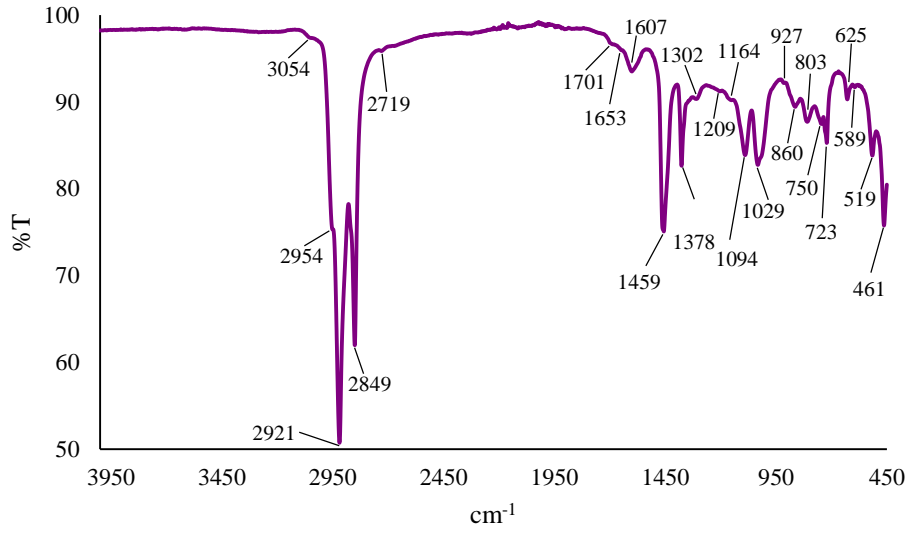
Şekil 3.4 %0 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu



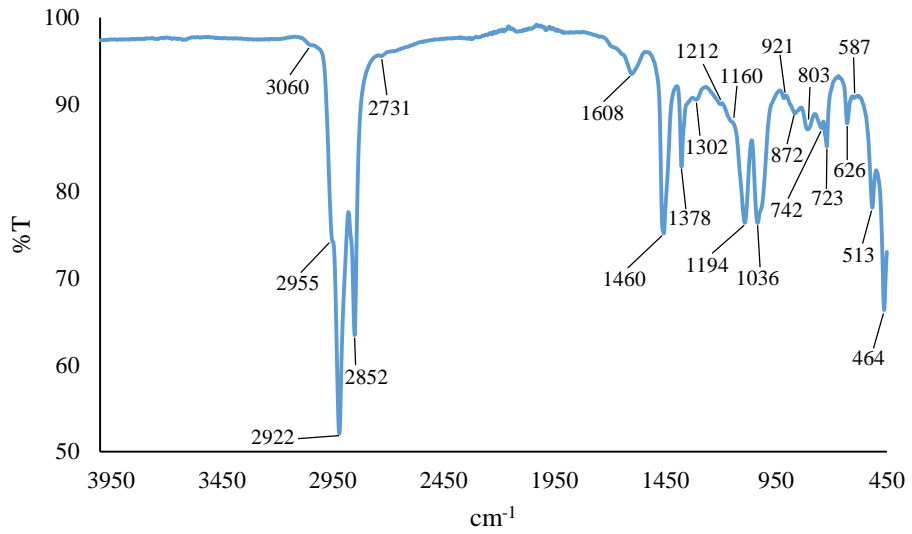
Şekil 3.5 %2 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu



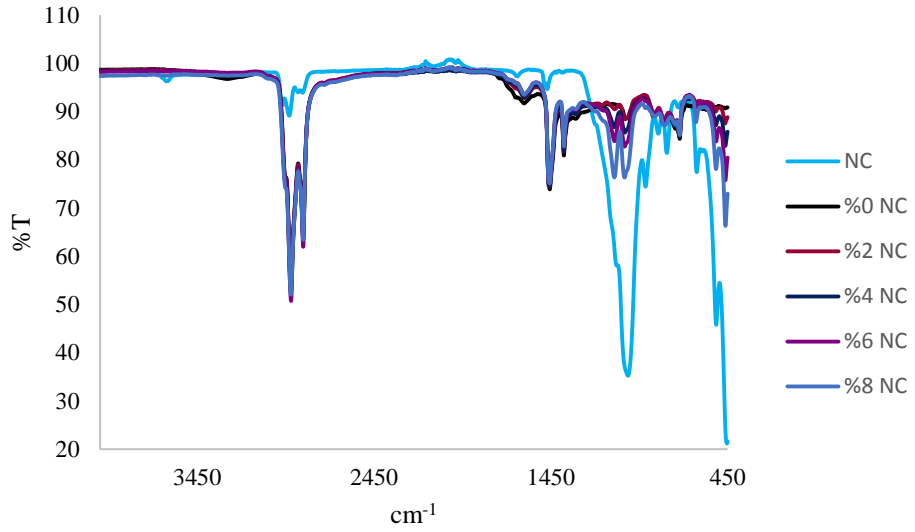
Şekil 3.6 %4 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu



Şekil 3.7 %6 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu



Şekil 3.8 %8 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin FT-IR spektrumu



**Şekil 3.9** Nanokil, orijinal ve %2-%8 katkı içeren asfalt bağlayıcı numunelerinin FT-IR spektrumları

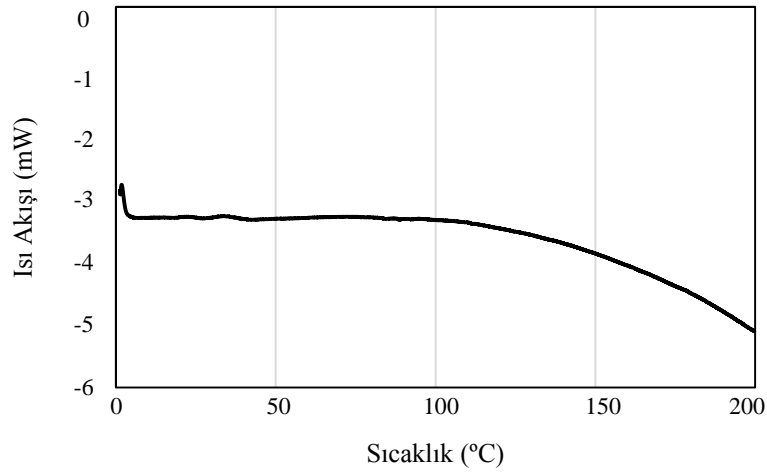
Katkısız asfalt bağlayıcının IR spektrumunda 2954, 2920 ve 2850  $\text{cm}^{-1}$ 'de alifatik karbon zincirine ait C-H gerilim bantları gözlenmektedir. Aynı hidrokarbon zincirinin 1600  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-C (tek bağlı) zinciri gerilim bantları gözlenmektedir. Yine hidrokarbon zincirinin ana iskeletinde var olduğu düşünülen  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  gruplarına ilişkin deformasyon bantları 1456 ve 1375  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenmektedir.

Katkının asfalt bağlayıcıya %2, %4, %6 ve %8 oranlarında ilave edilmesiyle artan yüzde oranlarına bağlı olarak özellikle iki temel bant sisteminde değişim gözlenmektedir. Bunlardan biri katkıda var olan 3620  $\text{cm}^{-1}$ 'deki H-O-H...O şeklindeki gerilim bandı karışımın bütününde tamamen yok olmaktadır. Diğer önemli bant ise montmorillonitte var olan ve iç içe görüntü veren C-O gerilim bandının (1082 ve 1006  $\text{cm}^{-1}$ ) karışım oluşumunda (modifiyesinde), yüzdeye bağlı olarak büyüdüğü özellikle %6 ve %8 oranlarında katkı ilavesi söz konusu olduğunda bu bantların sırasıyla %6 katkı oranında 1094 ve 1029  $\text{cm}^{-1}$ 'e ve %8 katkı oranında 1194 ve 1036  $\text{cm}^{-1}$ 'e kaydığı görülmektedir. Oldukça önemli bir değişimi ifade eden bu sonuç asfalt içeriğinin ve katkının katkı hücrelerinde OH grupları üzerinden etkileşerek bir araya geldiğini düşündürmektedir. Bu durum asfalt içerisinde polar gruplar olmamasına karşın,

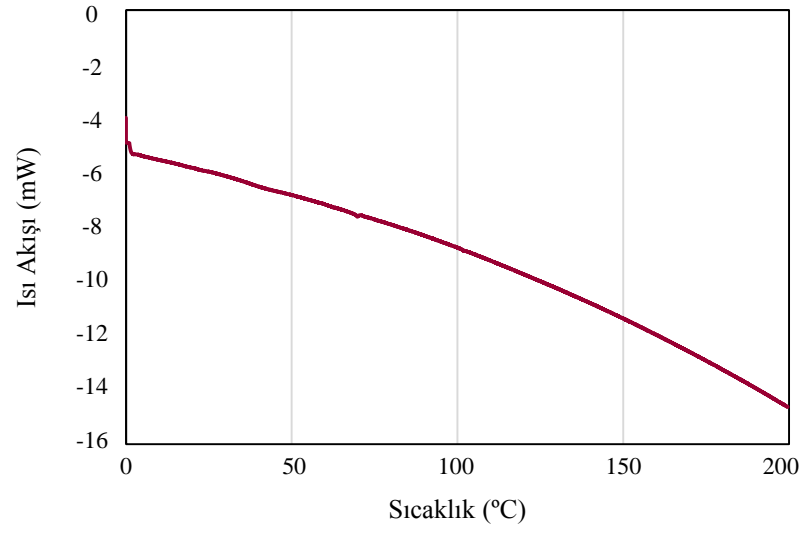
asfaltın Al-OH ya da Al-Mg-OH şeklinde örgülenmiş katkı içinde hücrelere girerek tutunduğuna işaret etmektedir.

### 3.2.2 DSC analiz sonuçları

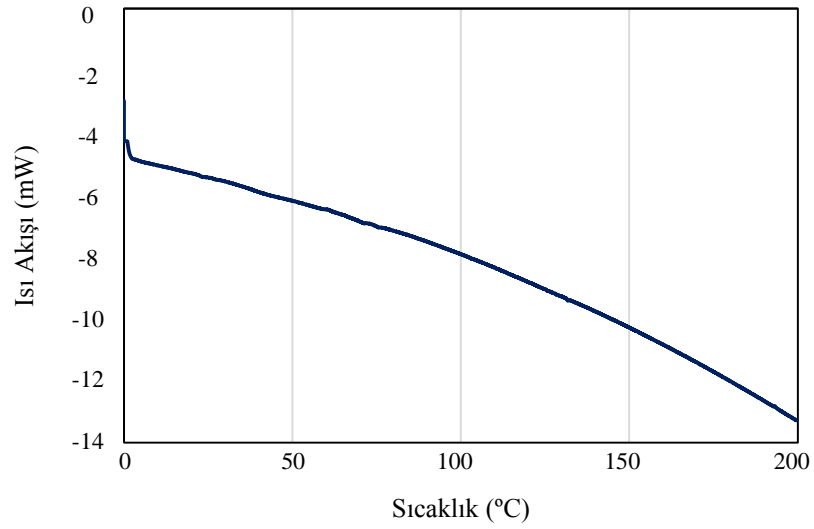
Çalışmada kullanılan %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarındaki katkı ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı numunelerine ilişkin termal analiz (DSC) eğrileri Şekil 3.10-3.15'te verilmiştir.



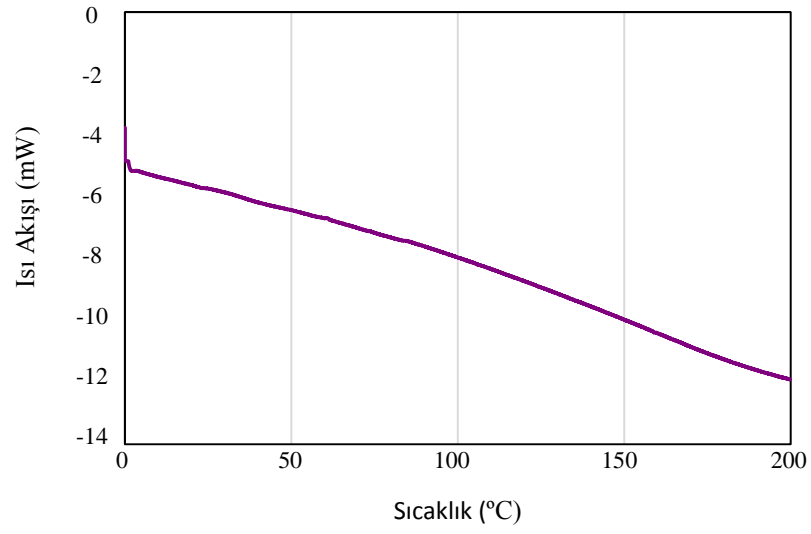
Şekil 3.10 %0 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi



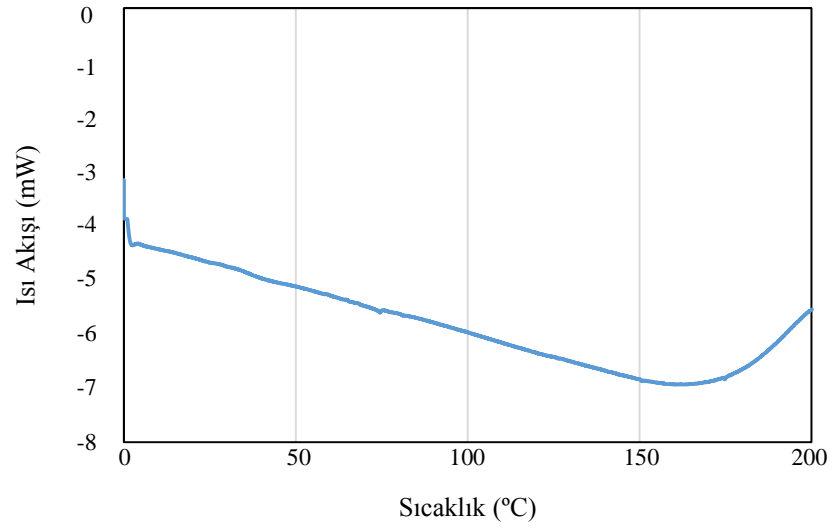
Şekil 3.11 %2 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi



Şekil 3.12 %4 NC katkıli asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi

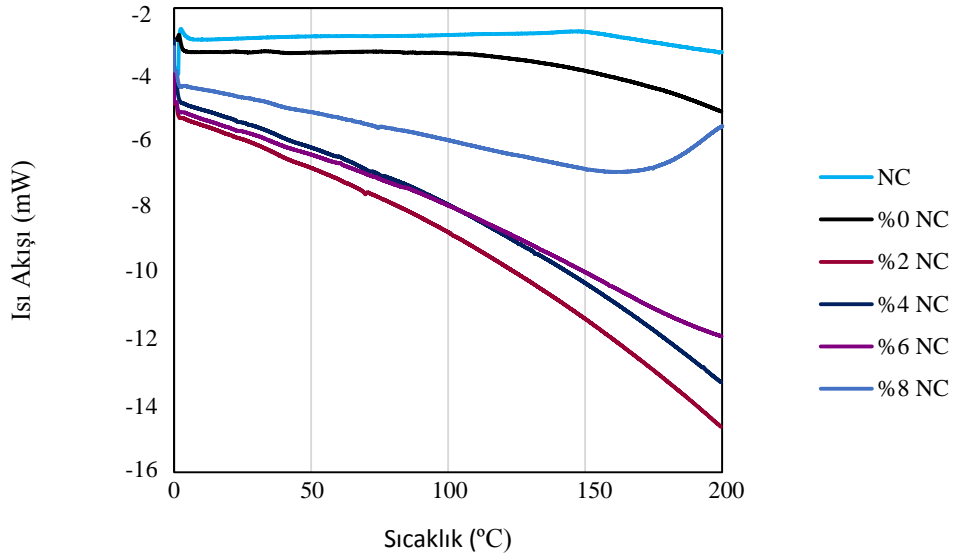


Şekil 3.13 %6 NC katkılı asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi



Şekil 3.14 %8 NC katkılı asfalt bağlayıcı numunesinin DSC eğrisi



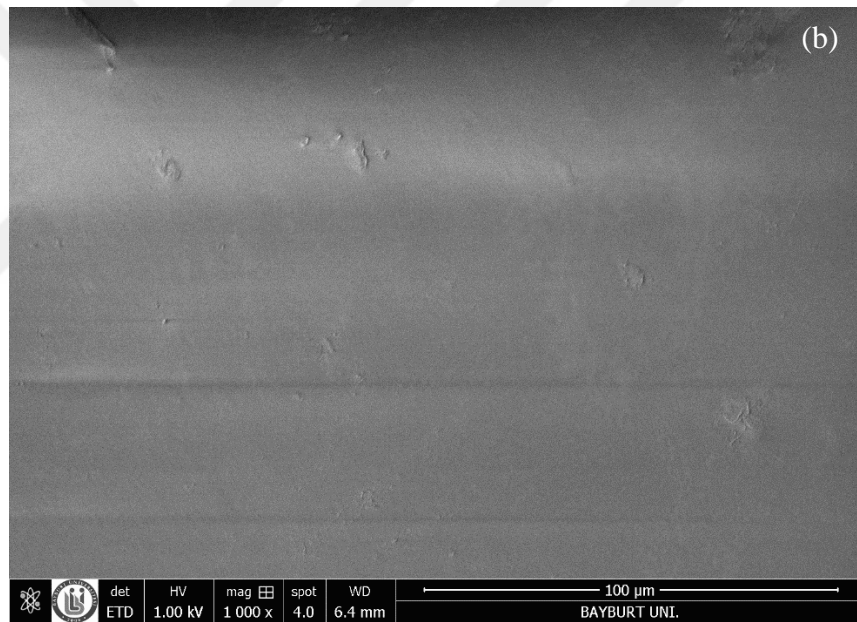
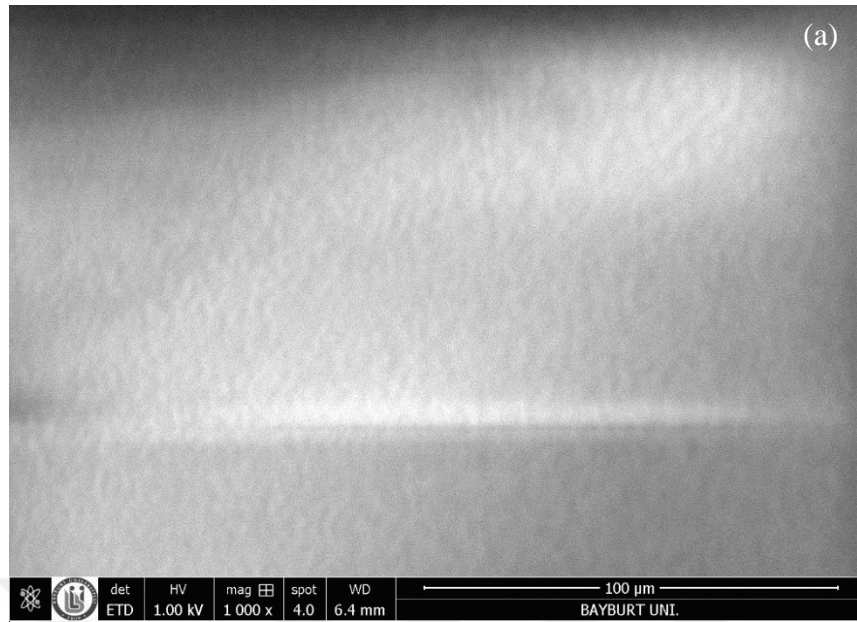


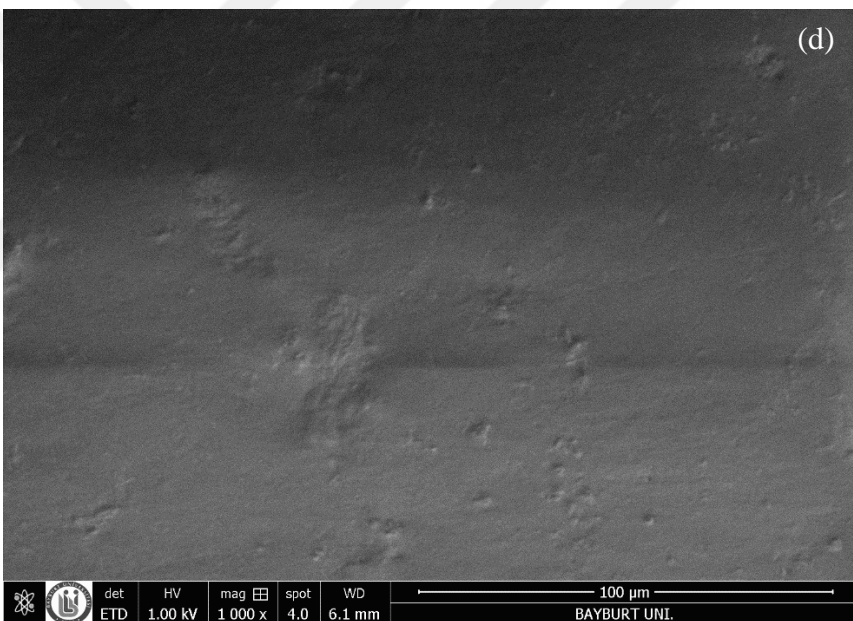
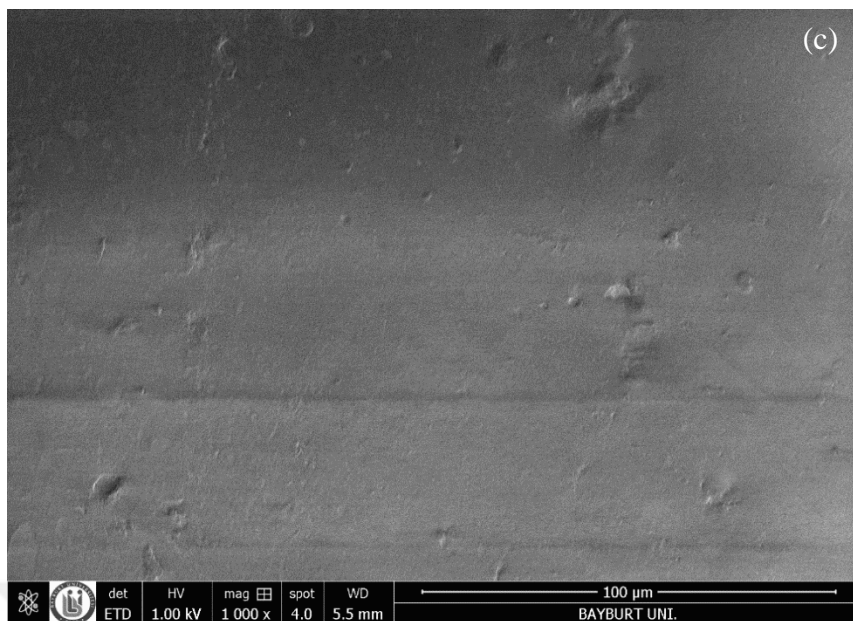
**Şekil 3.15** Nanokil, orijinal ve %2-%8 katkıli asphalt bağlayıcı numunelerinin DSC eğrileri

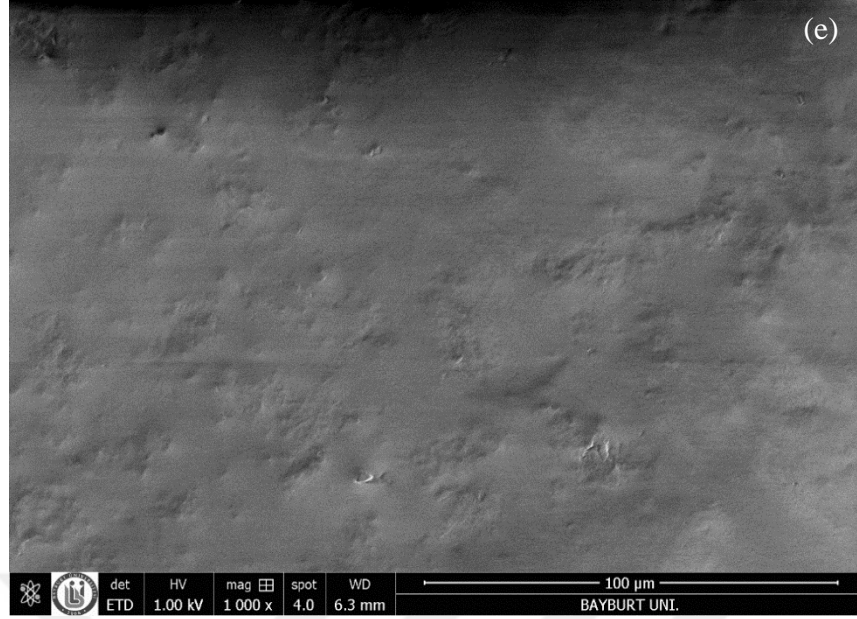
Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere orijinal asphalt 50°C civarındaki sıcaklıkta camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Orijinal asphaltın kristalleşme ve erime süreçleri ekzotermiktir. Şekil 3.11-3.14'te 50°C civarındaki sıcaklıkta camsı geçiş sıcaklığına sahip olan orijinal asphaltın katkı maddesinin ilavesiyle bu sıcaklık değerinin arttığı, ancak katkı maddesi oranının artmasına bağlı olarak kendi içinde azaldığı görülmektedir. %2, %4, %6 ve %8 oranlarında katkı içeren asphalt bağlayıcıların deneyin yapıldığı sıcaklıklardaki süreci (0°C - 200°C) ekzotermik süreçtir. Katkı maddesi oranının artırılması ile orijinal asphaltın kristalleşme noktası değeri düşmüş ve kristalleşme endotermik olarak yönelmiştir.

### 3.2.3 SEM analiz sonuçları

Şekil 3.16'da %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarındaki katkı ile modifiye edilmiş asphalt bağlayıcı numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir.





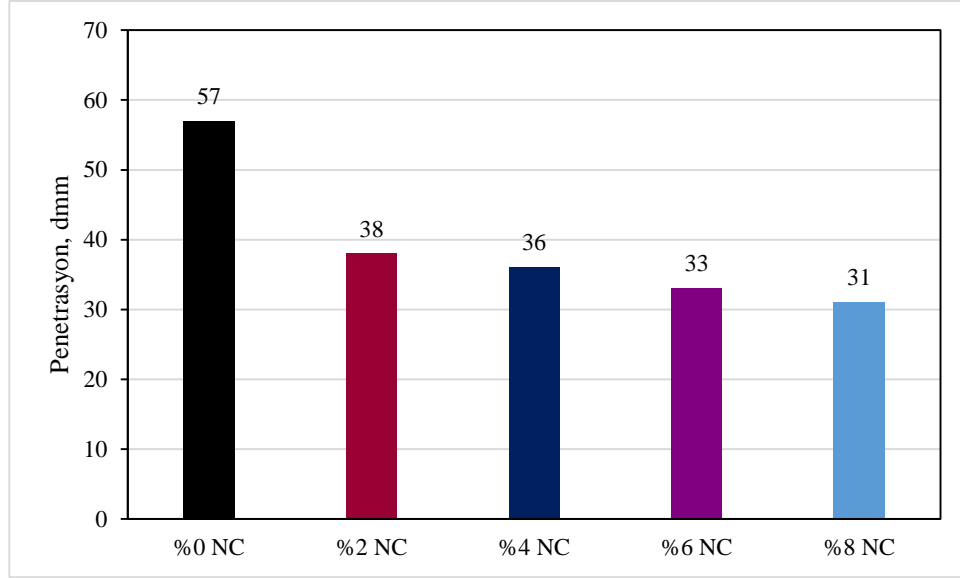


**Şekil 3.16** SEM görüntüleri; (a) %0 katkılı, (b) %2 katkılı, (c) %4 katkılı, (d) %6 katkılı, (e) %8 katkılı asfalt bağlayıcılar

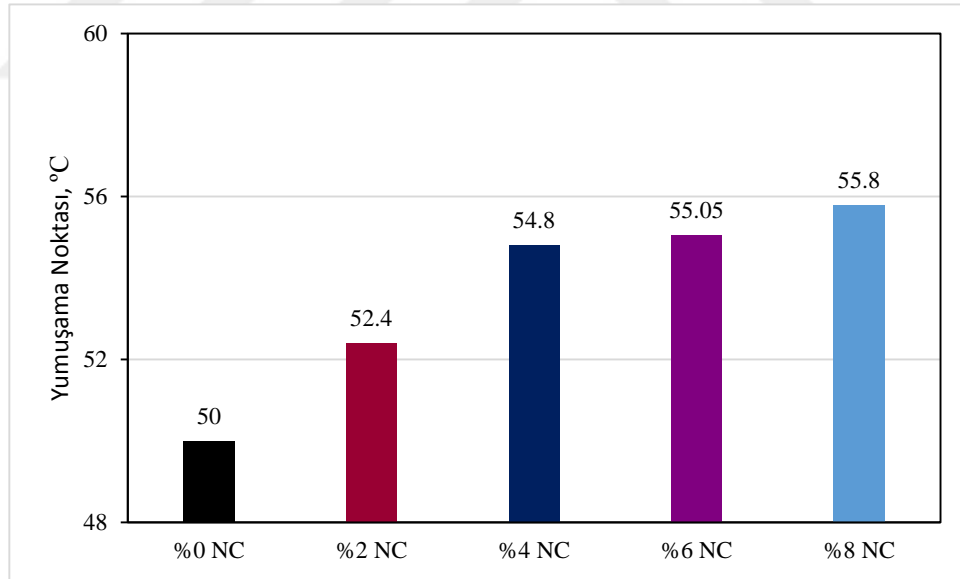
Şekil 3.16'daki SEM görüntüleri topluca incelendiğinde, asfaltın nanokil tabakalarının arasına nüfuz ettiği görülmektedir. Buradan modifiye işleminin yeterince başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Asfalt bağlayıcı içerisinde katkıdan dolayı maksimum 8 mikron çapında topaklanmalar görülmektedir. Nanomalzemelerde topaklanmaların oluşması doğal bir durumdur. Asfalt ile nanokil arasında oluşan bu topaklanmalar, malzemeler arasındaki kimyasal etkileşimden kaynaklanmaktadır.

### 3.3 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Organomontmorillonit nanokil katkı maddesinin asfalt bağlayıcıya katılmasıyla elde edilen modifiye asfalt bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de görülmektedir.



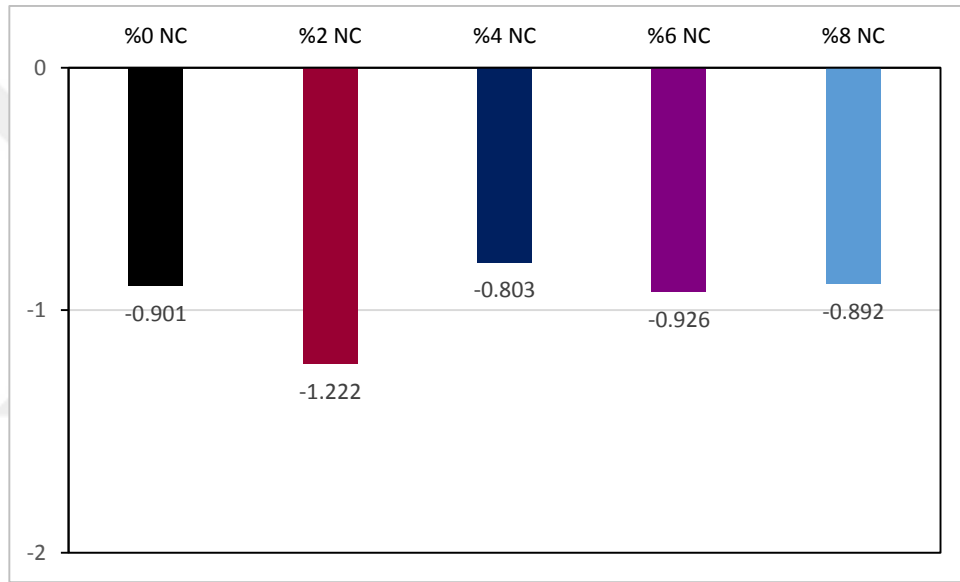
Şekil 3.17 Penetrasyon deney sonuçları



Şekil 3.18 Yumuşama noktası deney sonuçları

Orijinal asfaltın penetrasyon değeri %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriğinde sırasıyla %33.3, %36.8, %42.1 ve %45.6 oranlarında azalırken; yumuşama noktası değeri %4.8, %9.6, %10.1 ve %11.6 oranlarında artmıştır. Buradan, katkı maddesinin orijinal asfaltın kıvamını arttırdığı görülmektedir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine göre hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri Şekil 3.19’da verilmiştir.

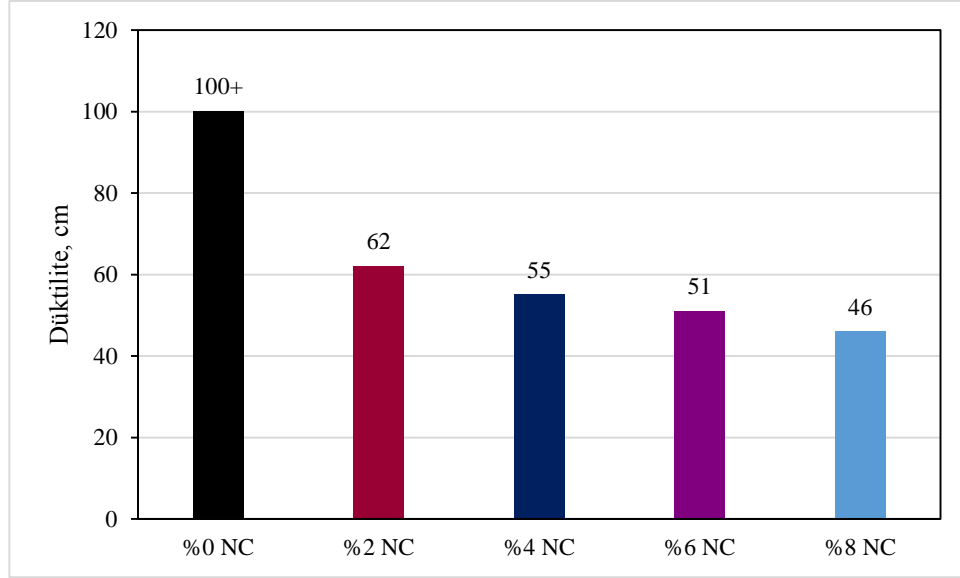


**Şekil 3.19** Sıcaklık Hassasiyetleri

Şekil 3.19’den görüleceği üzere %2 ve %6 katkı oranlarında asfaltın sıcaklık hassasiyeti artarken diğer katkı oranlarında sıcaklık hassasiyeti azalmış olup en fazla azalma %1 oranında %8 katkı içeriğinde elde edilmiştir.

### 3.4 Düktilite Deney Sonuçları

Düktilite deney sonuçları Şekil 3.20’de verilmiştir.



**Şekil 3.20** Düktilite deney sonuçları

Şekil 3.20’de, katkı miktarı arttıkça orijinal asfaltın düktilite değerinin azaldığı yani katkı maddesinin asfalt bağlayıcının yapısını sertleştirdiği görülmektedir. Orijinal asfalt bağlayıcının düktilite değerleri %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriklerinde sırasıyla %38, %45, %49 ve %54 oranlarında azalmıştır.

### 3.5 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

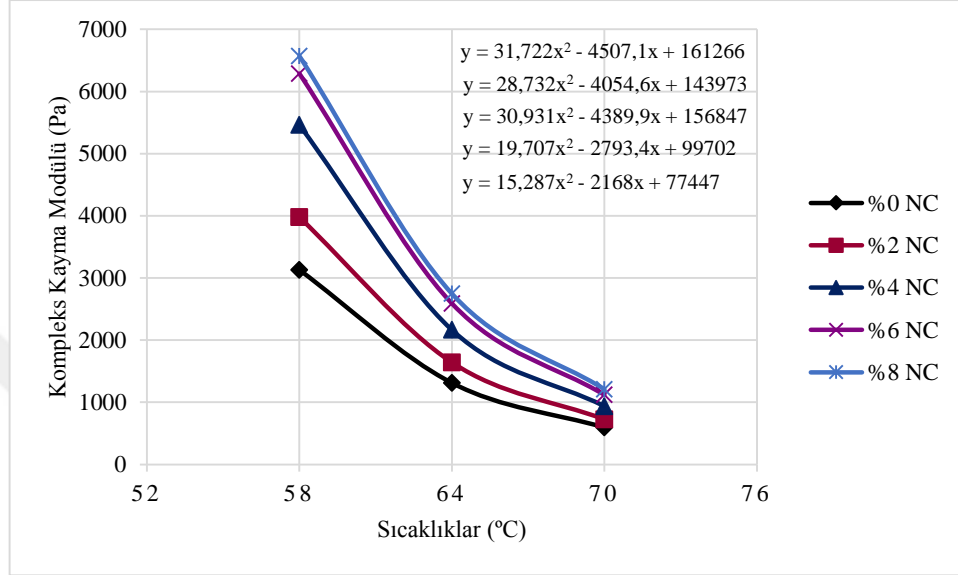
DSR deneyi 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz frekans, 25 mm paralel plakalar ve plakalar arası boşluk 1 mm ayarlanarak yapılmıştır. Deney sonucunda  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  parametre değerleri bulunmuş ve ilgili veriler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 DSR deney sonuçları

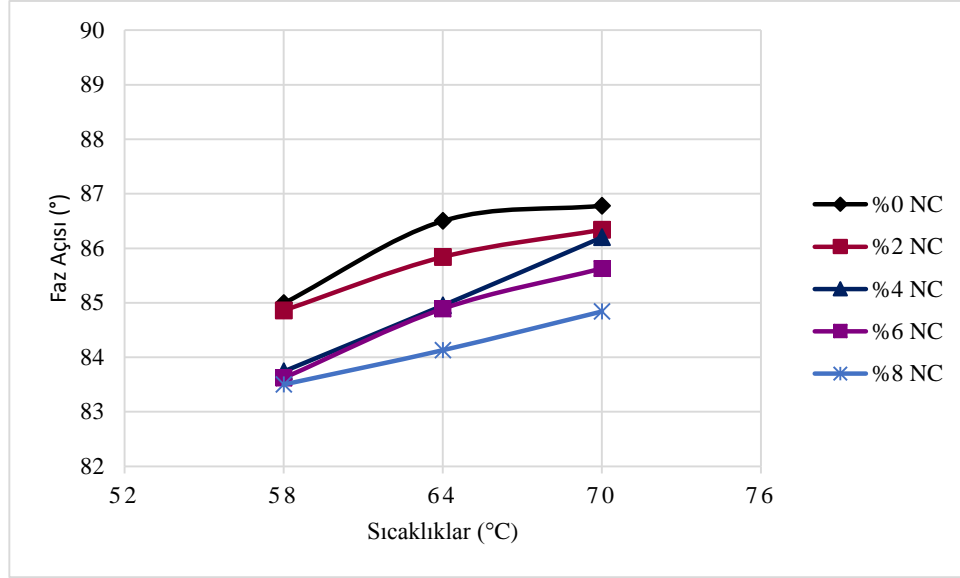
Numune Adı	Sıcaklık (°)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
%0	58	273.069	3117.64	3129.57	84.99	3141.55	1000 min.
	64	80.0739	1309.32	1311.76	86.5	1314.21	
	70	33.4407	593.664	594.605	86.78	595.548	
%2	58	356.181	3960.82	3976.81	84.86	3992.85	
	64	119.134	1637.21	1641.54	85.84	1645.88	
	70	46.306	723.675	725.155	86.34	726.638	
%4	58	617.824	5424.61	5459.68	83.74	5492.43	
	64	221.412	2152.54	2163.9	84.95	2172.33	
	70	84.286	933.042	936.841	86.2	938.91	
%6	58	685.151	6249.94	6287.39	83.62	6326.57	
	64	227.985	2579.79	2589.85	84.89	2600.18	
	70	74.209	1116.9	1119.36	85.63	1122.62	
%8	58	729.636	6528.47	6569.11	83.5	6611.61	
	64	244.482	2736.45	2747.34	84.13	2761.82	
	70	92.063	1206.07	1209.58	84.84	1214.5	



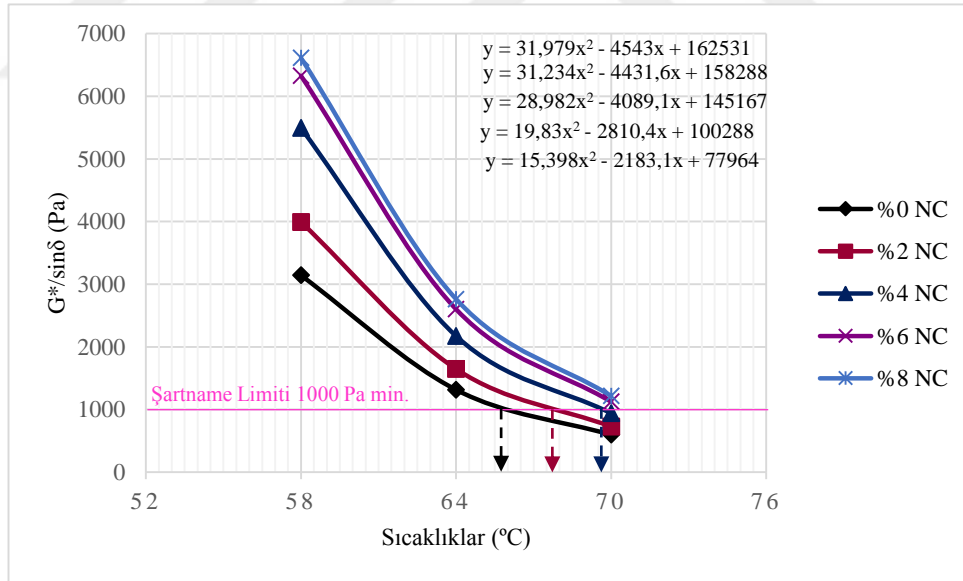
DSR deneyinden elde edilen  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerlerine ilişkin bulgular sırasıyla Şekil 3.21-3.23'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 3.21 Kompleks kayma modülü değerleri



Şekil 3.22  $\delta$  değerleri



Şekil 3.23  $G^*/\sin\delta$  değerleri

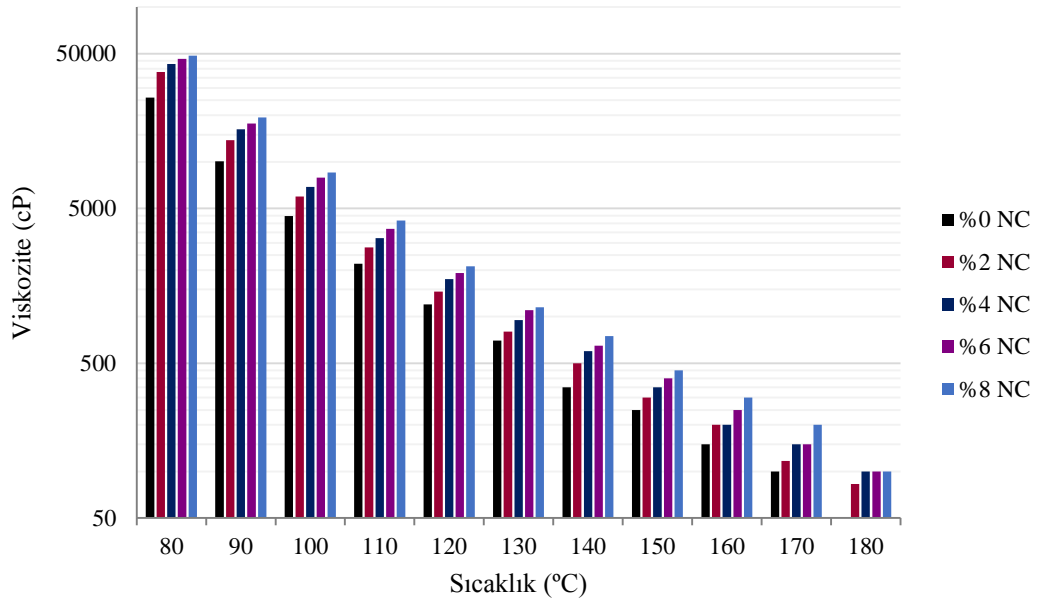
Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilen deney sonuçları incelendiğinde sıcaklık artışıyla birlikte asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin azaldığı ancak bu azalma sonunda elde edilen değerlerin deneyin yapıldığı her sıcaklıkta orijinal asfalta kıyasla daha yüksek seviyede olduğu, faz açısı değerlerinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle katkı maddesinin, orijinal asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek tekerlek izi dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de görülen sonuçlardan, 64°C sıcaklıkta %2 katkı oranında, orijinal asfaltın kompleks kayma modülü değerinin %25.14 oranında arttığı, faz açısı değerinin ise %0,76 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Buradan katkı maddesinin %2 gibi düşük bir oranda orijinal asfaltın elastik özelliğine fayda sağladığı ve tekerlek izi dayanımını arttırdığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.23’deki  $G^*/\sin\delta$  değerleri incelendiğinde %4 katkı oranında minimum 1000 Pa şartname limitinin 69.6°C sıcaklıkta sağlandığı ancak bir üst performans seviyesi olan 70°C’nin sağlanamadığı görülmektedir. Böylece %4 katkılı asfaltın performans seviyesi PG 64-Y şeklinde belirlenmiştir. Benzer şekilde katkısız ve %2 katkılı asfaltların performans seviyeleri de PG 64-Y şeklinde bulunmuştur. Ancak %6 ve %8 katkı oranlarında ise 1000 Pa şartname limiti 70°C’de sağlanmıştır. Orijinal asfaltın performans seviyesini 64°C’den 70°C’ye çıkararak PG seviyesini bir üst dereceye taşımış ve performans seviyesini PG 70-Y şeklinde değiştirmiştir. Bu da özellikle bu katkı oranlarında, orijinal asfaltın elastik özelliğinin ve buna bağlı olarak tekerlek izi dayanımının arttığı bir göstergesidir.

### 3.6 Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

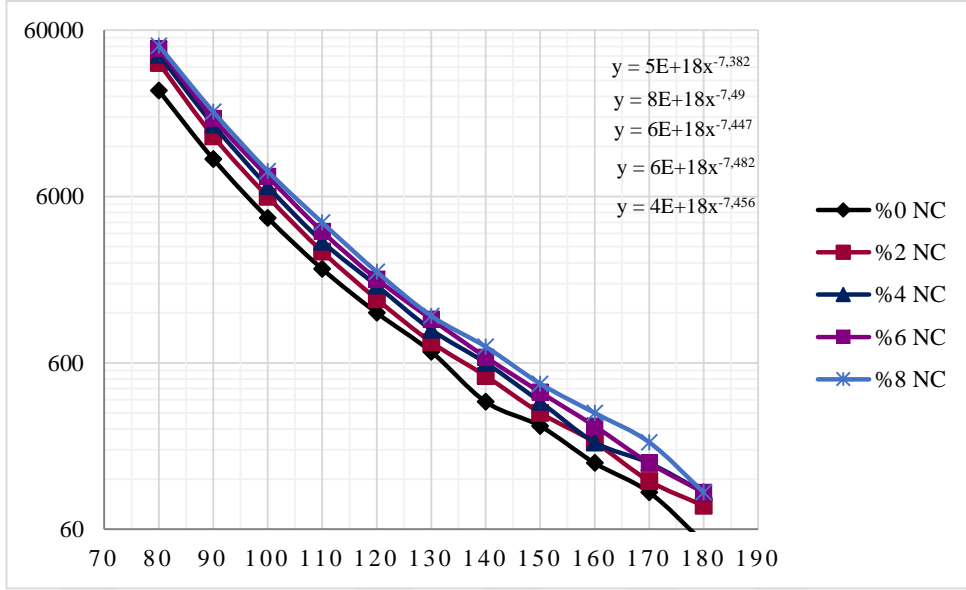
Orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcıların 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C ve 180°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri bulunmuştur (Çizelge 3.2 ve Şekil 3.24). Daha sonra bu verilerden yararlanılarak logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiş ve bu grafikten 135°C ve 165°C’deki viskozite değerleri bulunmuştur (Şekil 3.25 ve Çizelge 3.3). 135°C ve 165°C’deki viskozite değerlerinden yararlanılarak tekrar logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiştir (Şekil 3.26). Bu grafik üzerinden sırasıyla  $170\pm 20$  cP ve  $280\pm 30$  cP değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmış ve Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 RV deney sonuçları, cP

Numune	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C	130 °C	140 °C	150 °C	160 °C	170 °C	180 °C
%0 NC	26050	10100	4467	2200	1200	700	350	250	150	100	50
%2 NC	38150	13833	5983	2800	1450	800	500	300	200	117	83
%4 NC	42817	16233	6900	3217	1750	950	600	350	200	150	100
%6 NC	46350	17717	7917	3700	1917	1100	650	400	250	150	100
%8 NC	48467	19400	8533	4183	2117	1150	750	450	300	200	100



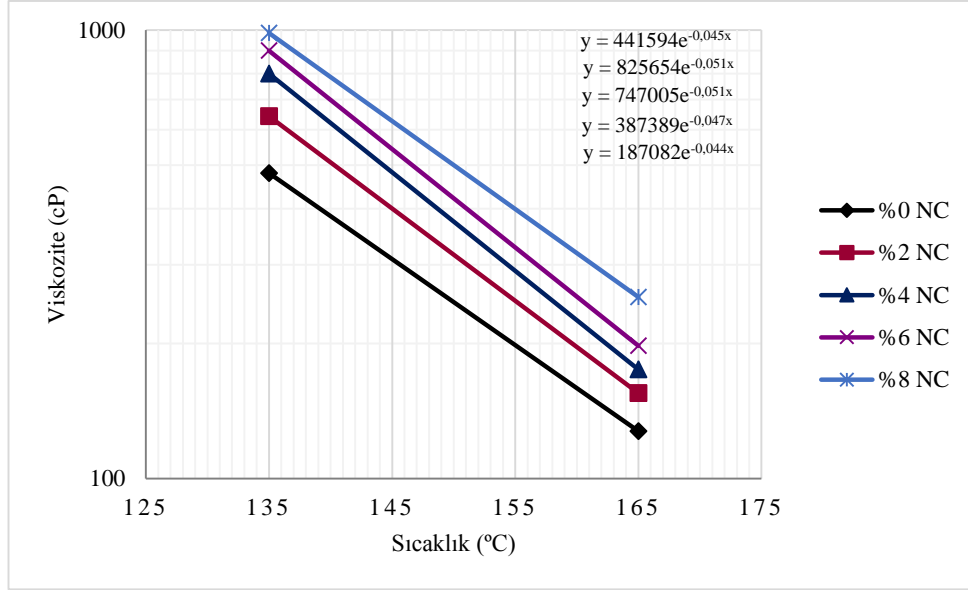
Şekil 3.24 Asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri



Şekil 3.25 Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Çizelge 3.3 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri, cP

Numune	135°C	165°C
%0 NC	480	127.5
%2 NC	642.86	155
%4 NC	800	175
%6 NC	900	197.65
%8 NC	985.71	253.85



Şekil 3.26 Logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği (135°C-165°C)

Çizelge 3.4 Asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

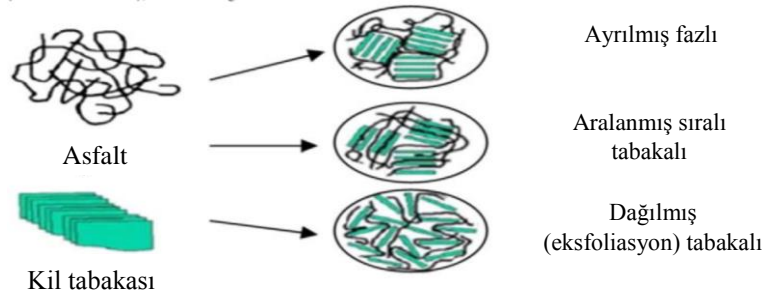
Numune	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	
	1	2	1	2
%0 NC	163	156	150	145
%2 NC	167	161	155	151
%4 NC	167	164	158	154
%6 NC	169	164	160	156
%8 NC	178	172	166	161

Katkı maddesi, deneyin yapıldığı her sıcaklıkta orijinal asfaltın viskozite değerini artırmıştır. Bu artış, katkı oranının artışıyla paralel olarak gerçekleşmiştir. Orijinal asfaltın 135°C'deki viskozite değerleri %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriklerine göre sırasıyla %33.93, %66.67, %87.5 ve %105.36 ve 165°C'de ise %21.57, %37.26, %55.02 ve %99.10 oranlarında artmıştır. 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri 3000

cP şartname limitini aşmamıştır. %2, %4, %6 ve %8 katkı içerikli modifiye asfalt numunelerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarında bir miktar artış olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar topluca değerlendirildiğinde, katkı maddesinin orijinal asfaltın kıvamını artırarak tekerlek izi direncini yükselttiği ve asfaltın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği anlaşılmaktadır.

### 3.7 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları

RTFOT sonrası asfalt numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve RV deneyleri yapılmıştır. Deneylere ilişkin veriler Çizelge 3.5'te verilmiştir. RTFOT deneyi sonrasında yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde artan katkı oranına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin düştüğü, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.28 ve Şekil 3.29). Orijinal asfaltın kalıcı penetrasyon değeri %50.88 oranında iken bu oran %2 katkı içeriğinde %65.79 oranına yükselmiş ve %4 ve %6 katkı içeriklerinde bu artışa devam ederek %8 katkı içeriğinde %70.97 oranına ulaşmıştır. Şekil 3.30'daki  $\Delta S$  (yaşlandırma sonrası yumuşama noktası-yaşlandırma öncesi yumuşama noktası) değerleri incelendiğinde artan katkı miktarına bağlı olarak yumuşama noktası sıcaklık farklarının orijinal asfalta göre azaldığı ve bu azalmanın %8 katkı içeriğinde %43.64 oranında olduğu görülmektedir. %4 katkı içeriğinde  $\Delta S$  farkı 1.9 olup bu katkı içeriğinde en iyi sonuca ulaşılmıştır. Katkı miktarıyla beraber  $\Delta S$  değerlerinin azalması asfalt içerisindeki organomontmorillonit tabakalarının eksfoliasyonu (dağılmış tabakalı, Şekil 3.27) ile açıklanabilir.

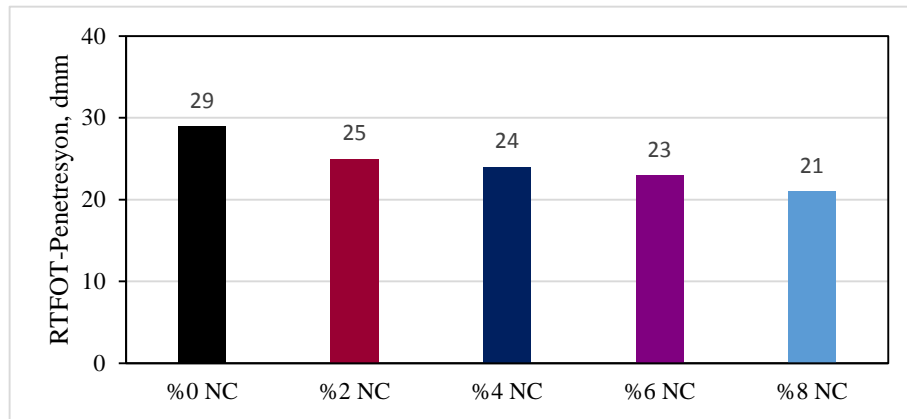


**Şekil 3.27** Organomontmorillonit modifiyeli asfalt bağlayıcının şematik gösterimi

Genel olarak, asfalttaki büyük moleküllü fraksiyonların içeriği, yaşlanma sırasında küçük moleküllerin oksidasyonunu artırır ve fiziksel sertleşme sonunda  $\Delta S$  değerlerinin artmasına neden olur. Ancak, organomontmorillonit nanokilin silikat tabakaları, asfaltın sertleşme sürecini kısıtlamış ve daha düşük  $\Delta S$  değerlerinin elde edilmesini sağlayarak asfaltın oksidasyonunu etkin bir şekilde engellemiştir. Sonuç olarak, katkı ilavesiyle asfaltın termo-oksidatif yaşlanma direnci artmıştır.

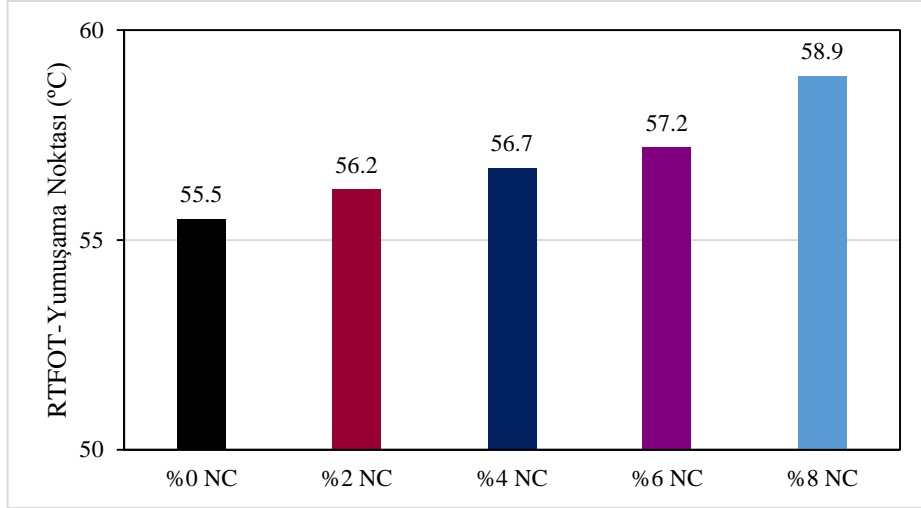
**Çizelge 3.5** RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri

Deneyler	%0	%2	%4	%6	%8
Yumuşama Nok. (°C)	55.5	56.2	56.7	57.2	58.9
$\Delta S$ (°C)	5.5	3.8	1.9	2.2	3.1
Penetrasyon (dmm)	29	25	24	23	22
Kalıcı Penetrasyon (%)	50.88	65.79	66.67	69.70	70.97
Kütle Kaybı (%)	0.06	0.12	0.19	0.2	0.27

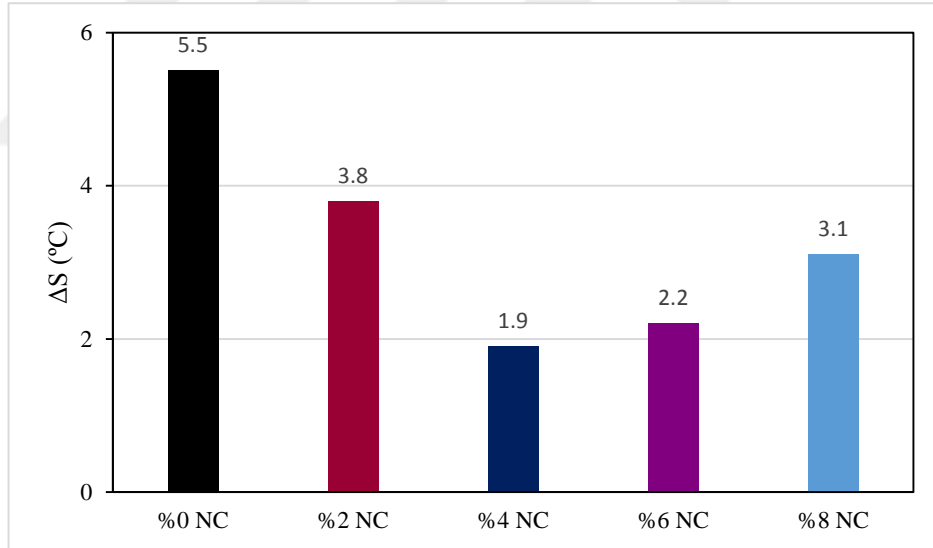


**Şekil 3.28** RTFOT deneyi sonrası penetrasyon değerleri





Şekil 3.29 RTFOT deneyi sonrası yumuşama noktası değerleri



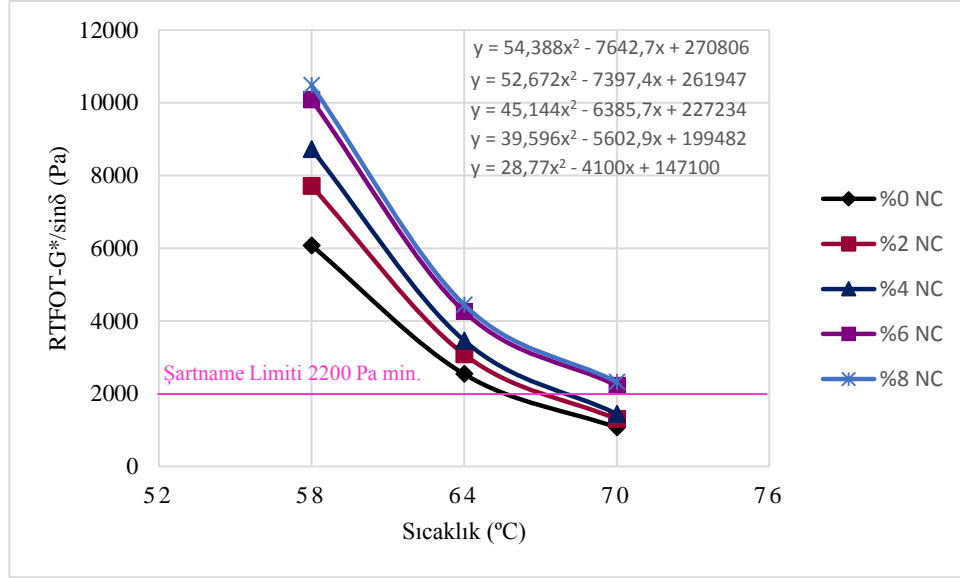
Şekil 3.30 RTFOT deneyi öncesi ve sonrası yumuşama noktası sıcaklık farkları

RTFOT deneyi sonrası orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcılara DSR deneyi yapılmıştır. DSR deneyi 58°C, 64°C ve 70°C’de kontrollü gerilme (120 Pa) altında, 1.59 Hz (10 rad/s) frekans, 25 mm paralel plakalar ve plakalar arası boşluk 1 mm

ayarlanarak yapılmıştır. Deney sonucunda  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin\delta$  parametre değerleri bulunmuştur. Bu parametrelere ilişkin veriler Çizelge 3.6'da  $G^*/\sin\delta$  değeri ise grafik olarak Şekil 3.31'de verilmiştir.

**Çizelge 3.6** RTFOT deneyi sonrası DSR deney sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°)	$G'$ (Pa)	$G''$ (Pa)	$G^*$ (Pa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin\delta$	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
%0 NC	58	625.748	6014.07	6046.54	84.06	6079.18	2200 min.
	64	180.369	2525.51	2531.94	85.91	2538.39	
	70	62.2802	1065.36	1067.18	86.65	1069.01	
%2 NC	58	897.667	7607.55	7660.33	83.27	7713.47	
	64	257.619	3058.46	3069.29	85.19	3080.16	
	70	79.272	1292.89	1295.32	86.49	1297.75	
%4 NC	58	1154.54	8574.09	8651.48	82.33	8729.56	
	64	337.958	3427.68	3444.30	84.37	3461.0	
	70	90.576	1437.11	1439.97	86.39	1442.82	
%6 NC	58	1491.46	9861.81	9973.95	81.40	10087.4	
	64	455.379	4207.378	4231.95	83.52	4259.16	
	70	150.784	2209.60	2214.74	84.96	2223.34	
%8 NC	58	1608.97	10238.2	10363.8	81.07	10491.0	
	64	506.60	4385.69	4414.85	83.10	4447.06	
	70	169.45	2302.68	2308.91	84.63	2319.09	



Şekil 3.31 RTFOT sonrası  $G^*/\sin\delta$  değerleri

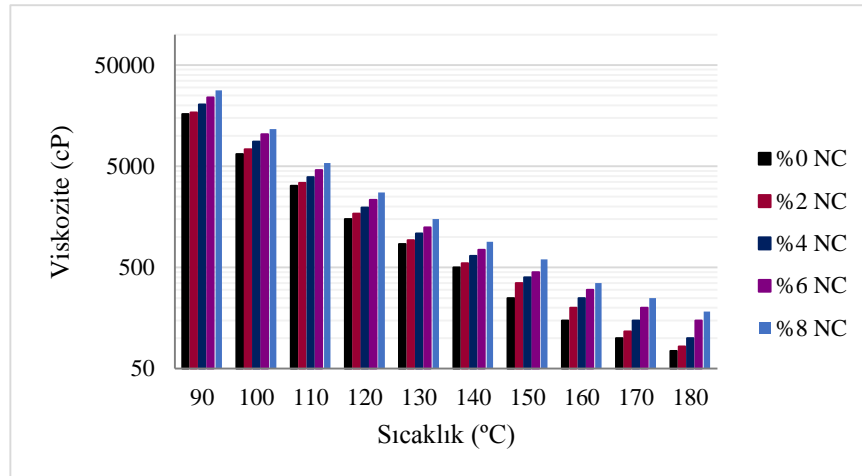
Çizelge 3.6'dan görüleceği üzere modifiye asfalt bağlayıcıların  $G'$ ,  $G''$ ,  $G^*$  ve  $G^*/\sin\delta$  değerleri, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda orijinal asfalt bağlayıcıya göre artış göstermiş; faz açısı değerleri ise azalmıştır. Orijinal asfalt bağlayıcıya göre %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriklerinde  $G^*/\sin\delta$  değerlerinde sırasıyla 58°C'de %26.88, %43.6, %65.93, %72.57; 64°C'de %21.34, %36.35, %67.79, %75.19 ve 70°C'de %21.4, %34.97, %107.98, %116.94 oranlarında artış olmuştur. Şekil 3.31'de görüldüğü üzere şartname limiti olan 2200 Pa değerini, bütün asfalt bağlayıcılar 64°C sıcaklıkta sağlarken 70°C sıcaklıkta %6 ve %8 katkı içerikleri sağlamıştır. %6 ve %8 katkı içeriklerinde bir üst performans seviyesine (PG 64'den PG 70 seviyesine) çıkan modifiye bağlayıcılar RTFOT sonrasında da bu performans seviyelerini korumuştur.

RTFOT deneyi sonrasında yapılan RV deneyi sonucunda katkı maddesinin, deneyin yapıldığı her sıcaklıkta yaşlandırılmış orijinal asfaltın viskozite değerini arttırdığı görülmüştür (Çizelge 3.7 ve Şekil 3.32). Bu artış, katkı oranının artışıyla paralel olarak gerçekleşmiştir. Daha sonra farklı sıcaklıklardaki (80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C ve 180°C) viskozite değerlerinden yararlanılarak çizilen logaritmik sıcaklık-viskozite grafiğinden 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.33 ve Çizelge 3.8). Yaşlandırılmış orijinal asfaltın

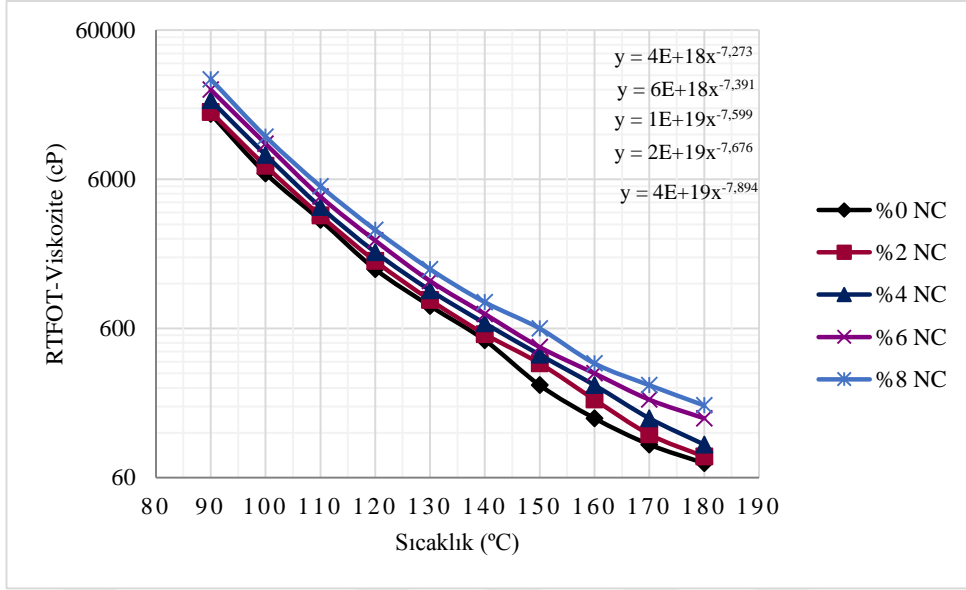
135°C'deki viskozite değerleri %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriğine göre sırasıyla %9,76, %29.27, %48.78 ve %70.73 ve 165°C ise %27.5, %63.33, %100 ve %141.67 oranlarında artmıştır. Asfalt katkı içeriklerinde, 135°C'deki viskozite değerleri 3000 cP şartname limitini geçmemiştir. 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri doğrultusunda logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilmiş ve bu grafik üzerinden sırasıyla 170±20 cP ve 280±30 cP değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları hesaplanmıştır (Şekil 3.34 ve Çizelge 3.9). %2, %4, %6 ve %8 katkı içerikli yaşlandırılmış modifiye asfalt numunelerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarında bir miktar artış olmuştur.

**Çizelge 3.7** RTFOT deneyi sonrası RV deney sonuçları

Numune	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C	130 °C	140 °C	150 °C	160 °C	170 °C	180 °C
%0 NC	45200	16433	6583	3200	1500	850	500	250	150	100	75
%2 NC	46083	17000	7383	3433	1700	933	550	350	200	117	83
%4 NC	50000(EE)	20350	8750	3917	1950	1083	650	400	250	150	100
%6 NC	50000(EE)	23933	10400	4600	2333	1250	750	450	300	200	150
%8 NC	50000(EE)	28150	11617	5400	2750	1500	900	600	350	250	183



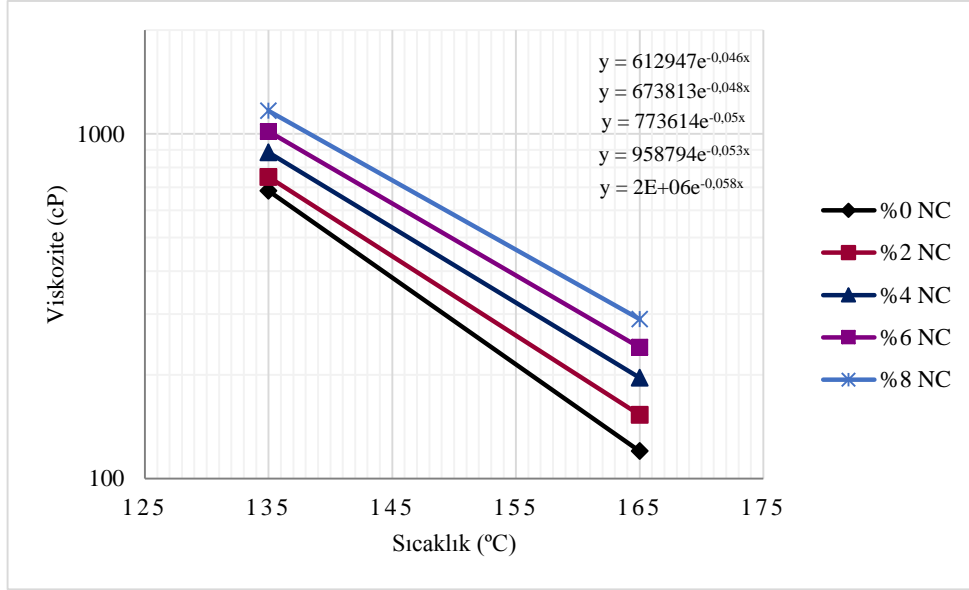
**Şekil 3.32** RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri



Şekil 3.33 RTFOT deneyi sonrası logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği

Çizelge 3.8 RTFOT deneyi sonrası 135°C ve 165°C'deki viskozite değerleri, cP

Numune	135°C	165°C
%0 NC	683.33	120
%2 NC	750	153
%4 NC	883.33	196
%6 NC	1016.67	240
%8 NC	1166.67	290



**Şekil 3.34** RTFOT deneyi sonrası logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği (135°C-165°C)

**Çizelge 3.9** RTFOT deneyi sonrası asfalt bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Numune	Karıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)		Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları (°C)	
%0 NC	162	158	147	144
%2 NC	165	161	150	147
%4 NC	171	166	154	150
%6 NC	175	170	157	154
%8 NC	181	176	161	158

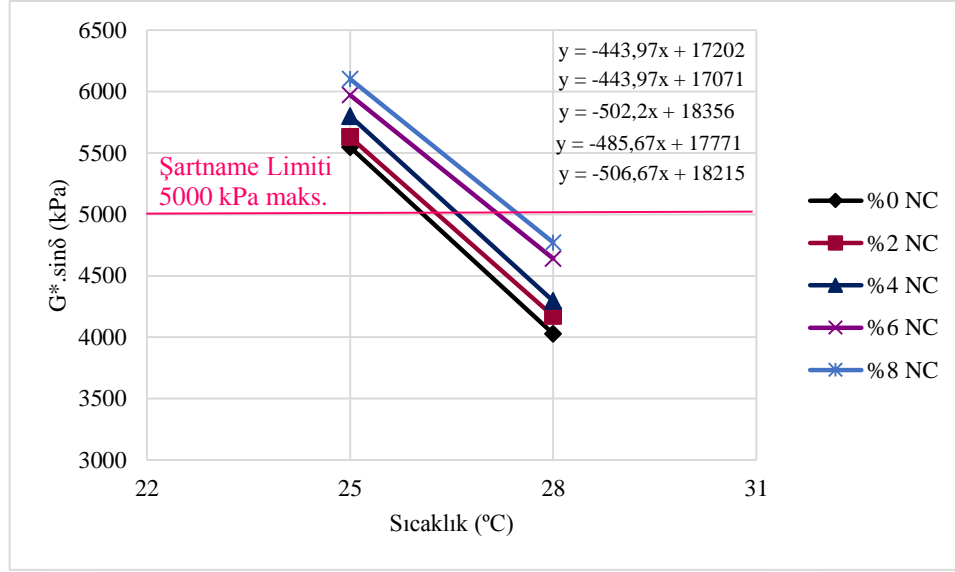
Asfalt bağlayıcıların yaşlandırmadan önce ve sonraki viskozite değerleri birbirleriyle kıyaslandığında çok fazla bir değişimin olmadığı ve katkı miktarının asfaltın kısa süreli yaşlanmasını geciktirerek yaşlanma direncini arttırdığı tespit edilmiştir.

### 3.8 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deney Sonuçları

RTFOT ile yaşlandırılmış orijinal ve modifiye asfalt bağlayıcı numunelerinin uzun süreli yaşlanmaları basınçlı yaşlandırma kabı deneyine tabi tutularak simule edilmiş ve bu deney sonrasında numunelere DSR deneyi uygulanmıştır. Deney verileri Çizelge 3.10'da verilmiş olup, yorulma direnci parametresinin ( $G^* \cdot \sin \delta$ ) sıcaklıkla değişimi Şekil 3.35'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.10** PAV deneyi sonrası DSR deney sonuçları

Numune	Sıcaklık (°C)	$G'$ (kPa)	$G''$ (kPa)	$G^*$ (kPa)	$\delta$ (°)	$G^* \cdot \sin \delta$ (kPa)	Şartname Limiti (kPa) (AASHTO T5)
%0 NC	25	7080	5548	8995	38.09	5548	5000 maks.
	28	4650	4028	6151	40.9	4028	
%2 NC	25	7163.47	5629	9110.48	38.16	5629	
	28	4643.25	4172	6242.22	41.94	4172	
%4 NC	25	7063	5801	9140	39.4	5801	
	28	4702	4294.4	6368	42.41	4294.4	
%6 NC	25	7168.06	5972.2	9329.96	39.8	5972.2	
	28	5021.61	4640.3	6837.32	42.74	4640.3	
%8 NC	25	7299.23	6103.1	9514.54	39.9	6103.1	
	28	5125.45	4771.2	7002.47	42.95	4771.2	



Şekil 3.35 PAV sonrası  $G^*.sin\delta$  değerleri

PAV sonrası DSR deneyinde, deneyin yapıldığı sıcaklıklarda yorulma direnci parametresini belirten  $G^*.sin\delta$  değerinin düşük olması ve 5000 kPa Superpave şartname limitini aşmaması gerekir. Bu değerinin düşük olması, bağlayıcının uzun süreli yaşlanma sonrası yorulmalara karşı daha dirençli olduğu anlamına gelir. Şekil 3.35'te görüldüğü gibi deney 25°C ile başlatılmış ve 28°C'de sonlandırılmıştır. Çünkü 25°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların yorulma direnci parametresi değerleri, 5000 kPa şartname sınır değerini aşmıştır. Bu sıcaklığı takip eden 28°C'de ise bütün bağlayıcılar gerekli sınır şartını sağlamıştır. Şekil 3.35'te görüldüğü gibi deneyin yapıldığı bu iki sıcaklıkta katkı maddesinin artışına bağlı olarak  $G^*.sin\delta$  değerlerinde bir artış görülmektedir. Bu artışlar, orijinal asfalta göre %2, %4, %6 ve %8 katkı içeriklerinde 25°C sıcaklık için sırasıyla %1.5, %4.6, %7.6 ve %10; 28°C sıcaklık için %3.6, %6.6, %15.2 ve %18.5 oranlarında olmuştur. Katkı maddesiyle asfaltın orta sıcaklıktaki yorulma direnci orijinal asfalta kıyasla azalmıştır.



#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Organomontmorillonit nanokil katkı maddesinin asfalt bağlayıcıda kullanımının araştırıldığı bu çalışmada, organomontmorillonit nanokil katkı maddesiyle modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların performansları orijinal asfalt bağlayıcıya göre kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Katkı maddesinin XRD kırınım deseninden, tabakalar arası mesafe  $d=19.77\text{\AA}$  olarak elde edilmiştir.  $14\text{\AA}$  tabakalar arası mesafeye sahip olan montmorillonitin yüzey aktif maddelerle modifiye edilmesi sonucu oluşan organomontmorillonitin tabakalar arası mesafesinin arttığı görülmüştür. Bu da nanokilin aktif yüzey alanını arttırdığından, asfalt bağlayıcı ve nanokil arasında kuvvetli ve geniş bir etkileşim olduğu düşünülmektedir.
- SEM sonuçlarından, asfalt bağlayıcının %2, %4, %6 ve %8 katkı oranları ile modifiyesi için gerçekleştirilen karıştırma şartlarının ( $150^{\circ}\text{C}$ , 1000 rpm ve 1 saat) uygun olduğu anlaşılmıştır. Nanokil ile asfalt bağlayıcı arasında kimyasal etkileşimden kaynaklanan topaklanmalar görülmüştür. Bu topaklanmalar nanomalzemelerde görülen doğal bir olaydır.
- FT-IR analiz sonuçlarından, katkı maddesinin  $3620\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen H-O-H...O gerilim bandı, katkının asfalta ilavesiyle tamamen ortadan kaybolmuştur. Katkı maddesinde var olan ve iç içe görüntü veren C-O gerilim bandının ( $1082$  ve  $1006\text{ cm}^{-1}$ ) katkı maddesi yüzdesine bağlı olarak büyüdüğü gözlenmekte ve özellikle %6 katkı içeriğinde  $1094\text{ cm}^{-1}$  ve  $1029\text{ cm}^{-1}$  iken %8 katkı içeriğinde  $1194\text{ cm}^{-1}$  ve  $1036\text{ cm}^{-1}$ 'e kaydığı görülmüştür. Bu durum katkı içerisindeki OH grupları ile asfaltın kimyasal etkileşiminden ileri gelmektedir.
- DSC analizine göre  $50^{\circ}\text{C}$  civarındaki sıcaklıkta camsı geçiş sıcaklığına sahip olan orijinal asfaltın katkı maddesinin ilavesiyle bu sıcaklık değerinin arttığı, ancak katkı maddesi oranının artmasına bağlı olarak kendi içinde azaldığı görülmüştür. Ayrıca katkı maddesi oranının artırılması ile orijinal asfaltın kristalleşme noktası değerinin düştüğü ve kristalleşmenin endotermik olarak yöneldiği belirlenmiştir.

- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri dikkate alındığında katkı oranının artışına bağlı olarak penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Böylece katkı maddesi orijinal asfaltın kıvamını arttırmış olup sıcaklık hassasiyetini azaltmıştır.
- Düktilite deney sonuçlarına göre modifiye asfalt bağlayıcının düktilite değerleri, orijinal asfalt bağlayıcıya göre katkı miktarının artışına bağlı olarak azalmış olup katkı ile birlikte orijinal asfalt bağlayıcının sertliği artmıştır.
- DSR deney sonuçlarından, katkı maddesinin asfaltın elastik özelliğini iyileştirerek yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Özellikle %6 ve %8 katkı içeriklerinde orijinal asfaltın performans seviyesini PG 64-Y seviyesinden bir üst seviye olan PG 70-Y seviyesine taşıdığı belirlenmiştir. Ayrıca RTFOT sonrası yapılan DSR deneyi sonucunda da istenilen şartname limit değerini (minimum 2200 Pa) 70°C’de sağlayarak PG 70-Y performans seviyesini yaşlanmadan önceki ve sonraki durumlarda sağlamış olduğu tespit edilmiştir.
- RTFOT deney sonuçlarından, orijinal asfalt bağlayıcıda katkı oranı artışıyla beraber kütle kayıplarında artışlar görülmüştür. Kütle kayıplarındaki bu artışlar katkı içerisinde bulunan hidrate suyun uzaklaşmasından ileri gelmiştir. Ayrıca katkı miktarının artışına bağlı olarak  $\Delta S$  değerlerinin azalması asfalt içerisindeki organomontmorillonit tabakalarının eksfoliasyonundan kaynaklanmıştır.
- RV deney sonuçlarından, katkı maddesinin orijinal asfaltın viskozite değerini arttırdığı, bu artışın viskozite deneyinin yapıldığı tüm deney sıcaklıklarında ortaya çıktığı ve viskozitedeki bu artışa rağmen katkı miktarının asfaltın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür. RTFOT sonrası yapılan RV deneyi sonucunda da aynı durumların belirlendiği tespit edilmiştir.
- PAV deneyi sonrası elde edilen bağlayıcılara 25°C ve 28°C sıcaklıklarda yapılan DSR deney sonuçlarından, şartname sınır şartının bütün katkı içeriklerinde 28°C sıcaklıkta sağlandığı görülmüştür. Katkı oranı artışıyla  $G^* \cdot \sin \delta$  parametre değerlerinde deneyin yapıldığı sıcaklıklarda orijinal asfalt bağlayıcıya göre artışlar olmuştur. Katkı maddesi, asfaltın orta sıcaklıktaki yorulma direncini orijinal asfalta kıyasla azaltmıştır.

Deney sonuçları topluca değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğu, katkının orijinal asfaltın kıvamını, tekerlek izi direncini, viskozitesini ve kısa süreli yaşlanma özelliğini arttırdığı, uzun süreli yaşlanma özelliğini ise azalttığı görülmüştür.

Yapılan bu tez çalışması esas alınarak bundan sonra yapılması düşünülen araştırmalarda aşağıda sıralanan öneriler dikkate alınabilir:

- Asfalt bağlayıcının orta sıcaklıklardaki yorulma direncinin artırılması amacıyla organomontmorillonit nanokil katkısı ile beraber EVA veya benzeri katkıları kullanılabilir.
- Farklı tip asfalt bağlayıcıları ve farklı karıştırma şartları dikkate alınarak modifikasyonlar yapılabilir.
- Asfalt karışım deneyleri yapılarak katkının karışımlar üzerindeki mekanik özellikleri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Abd El Rahman, A. M. M., El-Shafie, M. ve El Kholy, S. A. (2012). *Modification of Local Asphalt with Epoxy Resin to Be Used in Pavement*. **Egyptian Journal of Petroleum**, 21, 139-147.
- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Yusoff, N. I. Md. ve Hassan, N. A. (2016a). *High Temperature Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures with Nanoclay and Chemical Warm Mix Asphalt Modified Binders*. **Journal of Cleaner Production**, 122, 326-334.
- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Hassan, N. A. ve Yusoff, N. I. Md. (2016b). *Engineering Properties of Asphalt Binders Containing Nanoclay and Chemical Warm-Mix Asphalt Additives*. **Construction and Building Materials**, 112, 232-240.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M. (2007). *Bitümlü Bağlayıcıların Yaşlandırılmasında Kullanılan Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması*. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 23 (1-2), 112-126.
- Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T. (2008). *Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı*. **İMO Teknik Dergi**, 297, 4493-4507.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M. (2008/2). *Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi*. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 24 (1-2), 227-240.
- Aksoy, A. (2002). *Bitüm Reolojik Yapısının Bitümün Yaşlanmasına ve Kaplamanın Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi*, **Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi**, Ankara.
- Alataş, T. ve Kizirgil, M. E. (2012). *Saf ve Polimer Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Dönel Viskozimetre Deneyi ile Belirlenmesi*. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 28 (3), 249-256.

- Alp, T. (2012). *Montmorillonit Türü Kil Minerali ile Sulu Ortamdan Nitrit İyonlarının Giderimi ve İyon Kromatografi ile Tayini*. **Yüksek Lisans Tezi**, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 48.
- Ameri, M., Nobakht, S., Bemana, K., Rooholamini, H. ve Vamegh, M. (2016). *Effect of Nanoclay on Fatigue Life of Hot Mix Asphalt*. **Petroleum Science and Technology**, 34 (11-12), 1021-1025.
- Angın, Z. ve Angın A. (2005). *Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi*. **Geoteknik Sempozyumu**, Adana.
- Arıkan Öztürk, E. ve Çubuk, M. K. (2004). *Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama*. **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 19 (2), 175-184.
- Ashish, P. K., Singh, D. ve Bohm, S. (2016). *Evaluation of Rutting, Fatigue and Moisture Damage Performance of Nanoclay Modified Asphalt Binder*. **Construction and Building Materials**, 113, 341-350.
- Atasağun, N. (2009). *Piroliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Çörekotu Küspesi ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri*, **Yüksek Lisans Tezi**, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71, 77.
- Atatürk Üniversitesi, *X-Işını Kırınım Cihazı (XRD)*. <http://daytam.atauni.edu.tr/cihaz/jsr-inkubator>, 29.04.2018.
- Azahar, W. N. A. W., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Bujang, M. ve Ngadi, N. (2016). *Chemical Modification of Waste Cooking Oil to Improve The Physical and Rheological Properties of Asphalt Binder*. **Construction and Building Materials**, 126, 218-226.
- Batman, A. (2015). *Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. **Yüksek Lisans Tezi**, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8-9.
- Bayburt Üniversitesi, *Cihazlar*. <http://bumer.bayburt.edu.tr/cihazlar.php>, 24.05.2018.
- Bibi, I., Icenhower J., Niazi, N. K., Naz, T., Shahid, M. ve Bashir, S. (2016). *Chapter 21 – Clay Minerals: Structure, Chemistry, and Significance in Contaminated Environments and Geological CO<sub>2</sub> Sequestration*. **Environmental Material and Waste Resource Recovery and Pollution Prevention**, 543-567.

- Binat, Z. (2016). *Kuaterner Amonyum Tuzuyla Organokil Eldesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 11-18.
- Bonati, A., Merusi, F., Bochicchio, G., Tessadri, B., Polacco, G., Filippi, S. ve Giuliani, F. (2013). *Effect of Nanoclay and Conventional Flame Reterdants on Asphalt Mixtures Fire Reaction. Construction and Building Materials*, 47, 990-1000.
- Bostancıoğlu, M. (2012). *Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler ile Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 76.
- Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, *Bitümlü Bağlayıcılar*. [http://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/0420\\_1759\\_dosya.pdf](http://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/0420_1759_dosya.pdf), 22.06.2017.
- Büyüksaraçoğlu, Y. (2009). *Asfalt Yol İnşaatının Tedarik Zincirinin Simülasyon Tabanlı Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 40.
- Çalımlı, A. (2008). *Nanokil-Polimer Kompozitlerinin Sentez ve Karakterizasyonu. Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri*.
- Çubuk, M. (2007). *Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi. Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 19, 68, 70.
- de Melo, J. V. S. ve Trichês, G. (2017). *Evaluation of Properties and Fatigue Life Estimation of Asphalt Mixture Modified by Organophilic Nanoclay. Construction and Building Materials*, 140, 364-373.
- Demirkaya, Ö. (2016). *Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2.
- de Paiva, L. B., Morales, A. R. ve Díaz, F. R. V. (2008). *Organoclays: Properties, Preparation and Applications. Applied Clay Science*, 42, 8-24.
- Dokuz Eylül Üniversitesi, *IR Spektroskopisi*, <http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/MMZ3015MalzemekarakterizasyonuII/ftir.pdf>, 14.12.2017.

- El-Shafie, M., Ibrahim, I. M. ve Abd El Rahman, A. M. M. (2012). *The Addition Effects of Macro and Nano Clay on The Performance of Asphalt Binder*. **Egyptian Journal of Petroleum**, 21, 149-154.
- Enieb, M. ve Diab, A. (2017). *Characteristics of Asphalt Binder and Mixture Containing Nanosilica*. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 10, 148-157.
- Erten Kanat, E. (2013). *Yeni Organofilik Montmorillonitlerin Boyarmadde Uzaklaştırılmasında Kullanımı*. **Yüksek Lisans Tezi**, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 32-34.
- Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E. I. ve Breakah, T. (2016). *Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica*. **Procedia Engineering**, 143, 1260-1267.
- Fang, C., Yu, R., Zhang, Y., Hu, J., Zhang, M. ve Mi, X. (2012). *Combined Modification of Asphalt with Polyethylene Packing Waste and Organophilic Montmorillonite*. **Polymer Testing**, 31, 276-281.
- Farias, L. G. A. T., Leitinho, J. L., Amoni, B. C., Bastos, J. B. S., Soares, J. B., Soares, S. A. ve de Sant'Ana, H. B. (2016). *Effects of Nanoclay and Nanocomposites on Bitumen Rheological Properties*. **Construction and Building Materials**, 125, 873-883.
- Geçkil, T. (2008). *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 43-44, 81-83.
- Ge, D., Yan, K., You, Z. ve Xu, H. (2016). *Modification Mechanism of Asphalt Binder with Waste Tire Rubber and Recycled Polyethylene*. **Construction and Building Materials**, 126, 66-76.
- Ge, D., Yan, K., You, L. ve Wang, Z. (2017). *Modification Mechanism of Asphalt Modified with Sasobit and Polyphosphoric Acid (PPA)*. **Construction and Building Materials**, 143, 419-428.
- Golestani, B., Nam, B. H., Nejad, F. M. ve Fallah, S. (2015). *Nanoclay Application to Asphalt Concrete: Characterization of Polymer and Linear Nanocomposite-Modified Asphalt Binder and Mixture*. **Construction and Building Materials**, 91, 32-38.

- Han, Z., Sha, A., Tong, Z., Liu, Z., Gao, J., Zou, X. ve Yuan, D. (2017). *Study on The Optimum Rice Husk Ash Content Added in Asphalt Binder and Its Modification with Bio-Oil*. **Construction and Building Materials**, 147, 776-789.
- Hussein, A. A., Jaya, R. P., Hassan, N. A., Yaacob, H., Huseien, G. F. ve Ibrahim, M. H. W. (2017). *Performance of Nanoceramic Powder on The Chemical and Physical Properties of Bitumen*. **Construction and Building Materials**, 156, 496-505.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı (2001). **Asfalt ve Uygulamaları** (1. Baskı). İstanbul: İsfalt Bilimsel Yayın, 91-97.
- Iskender, E. (2016). *Evaluation of Mechanical Properties of Nano-Clay Modified Asphalt Mixtures*. **Measurement**, 93, 359-371.
- İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, *X-Işını Difraktometresi (XRD)*. <http://merkeziarastirmalab.ikc.edu.tr/S/15251/x-isini-difraktometresi-xrd>, 29.04.2018.
- Jahromi, S. G. ve Khodaii, A. (2009). *Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder*. **Construction and Building Materials**, 23, 2894-2904.
- Jasso, M., Bakos, D., MacLeod, D. ve Zanzotto, L. (2013). *Preparation and Properties of Conventional Asphalt Modified by Physical Mixtures of Linear SBS and Montmorillonite Clay*. **Construction and Building Materials**, 38, 759-765.
- Karabük Üniversitesi, *Zemin Mekaniği Kil Mineralleri ve Zemin Yapısı*. <http://www.inankeskin.com/index.php/zds>, 01.05.2018.
- Kaya, M. (2011). *Türkiye Coğrafi Bölgeleri için Bitümlü Bağlayıcıların Performans Derecelerinin Belirlenmesi ve SBS Katkılı Gözlem Yolu Yapılması*, **Doktora Tezi**, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 26, 31-32, 36-37, 47, 49, 52.
- Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R. ve Zhang, P. (2012). *The Impact of Carbon Nano-Fiber Modification on Asphalt Binder Rheology*. **Construction and Building Materials**, 30, 257-264.
- King, P.L., Ramsey, M. S., McMillan, P. F. ve Swayze, G. (2004). *Chapter 3: Laboratory Fourier Transform Infrared Spectroscopy Methods for Geologic Samples*. <http://www.pitt.edu/~mramsey/papers/GAC2.pdf>, 28.04.2018.



- Koç, Z. (2011). *Poliakrilamit/Na-Montmorillonit ve Poli(2-Hidroksi Etil Metakrilat)/Na-Montmorillonit Nanokompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu*. **Yüksek Lisans Tezi**, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 14.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M. ve Kök, B. V. (2008). *Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi*. **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 13 (1), 81-91.
- Lee, S. Y. ve Kim, S. J. (2002). *Expansion Characteristics of Organoclay as A Precursor to Nanocomposites*. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, 211, 19-26.
- Li, L., Wu, S., Liu, G., Cao, T. ve Amirkhanian, S. (2017). *Effect of Organo-Montmorillonite Nanoclay on VOCs Inhibition of Bitumen*. **Construction and Building Materials**, 146, 429-435.
- Li, P., Ding, Z., Zou, P. ve Sun, A. (2017). *Analysis of Physico-Chemical Properties for Crumb Rubber in Process of Asphalt Modification*. **Construction and Building Materials**, 138, 418-426.
- Li, R. Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. ve Huang, J. (2017). *Developments of Nano Materials and Technologies on Asphalt Materials- A Review*. **Construction and Building Materials**, 143, 633-648.
- Liu, H., Chen, Z., Wang, W., Wang, H. ve Hao, P. (2014). *Investigation of The Rheological Modification Mechanism of Crumb Rubber Modified Asphalt (CRMA) Containing TOR Additive*. **Construction and Building Materials**, 67, 225-233.
- Liu, K., Zhang, K. ve Shi, X. (2018). *Performance Evaluation and Modification Mechanism Analysis of Asphalt Binders Modified by Graphene Oxide*. **Construction and Building Materials**, 163, 880-889.
- Li, X., Ouyang, C., Yuan, Y., Gao, Q., Zheng, K. ve Yan, J. (2015). *Evaluation of Ethylene-Acrylic Acid Copolymer (EAA)-Modified Asphalt: Fundamental Investigations on Mechanical and Rheological Properties*. **Construction and Building Materials**, 90, 44-52.

- Malayoğlu, U. ve Akar, A. (1995), *Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi*. **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, İzmir.
- Minerology Database, *Mineral Specimen Images (M)*. <http://webmineral.com/>, 01.05.2018.
- Murray, H. H. (1991). *Overview-Clay Mineral Applications*. **Applied Clay Science**, 5, 379-395.
- Nazari, H., Naderi, K. ve Nejad, F. M. (2018). *Improving Aging Resistance and Fatigue Performance of Asphalt Binders Using Inorganic Nanoparticles*. **Construction and Building Materials**, 170, 591-602.
- Orhan, F. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. **Karayolları Genel Müdürlüğü**, Ankara.
- Orta Doğu Teknik Üniversitesi, *Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)*. <https://merlab.metu.edu.tr/tr/diferansiyel-taramali-kalorimetre-dsc>, 4.05.2018.
- Oruç, Ş. (1997). *Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması*. **Yüksek Lisans Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 35-41.
- Oruç, Ş. ve Yılmaz, B. (2016). *Improvement in Performance Properties of Asphalt Using A Novel Boron-Containing Additive*. **Construction and Building Materials**, 123, 207-213.
- Önalp, A. (2007). **Geoteknik Bilgisi I Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği (3. Baskı)**. İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti., 32.
- Öztürk, Y. E. (2012). *Kil Mineralleri Açısından İnce Daneli Zeminlerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri ile Kıvam Limitleri Arasındaki İlişkiler*. **Yüksek Lisans Tezi**, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 4, 6.
- Parvez, M. A., Al-Abdul Wahhab, H. I., Shawabkeh, R. A. ve Hussein, I. A. (2014). *Asphalt Modification Using Acid Treated Waste Oil Fly Ash*. **Construction and Building Materials**, 70, 201-209.
- Sağlık, A., Orhan, F. ve Güngör, A. G. (2012), *BSK Kaplamalı Yollar için Bitüm Sınıfı Seçim Haritaları*, **Karayolları Genel Müdürlüğü**, Ankara.

- Sağlık, A. (2009). *Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı için Performans Sınıflarının Belirlenmesi*, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8, 11-12, 43-44, 63.
- Selçuk Üniversitesi, *XRD-X Işını Kırınım Cihazı*.  
[https://www.selcuk.edu.tr/ileri\\_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5877/tr](https://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5877/tr),  
 29.04.2018.
- Sun, L., Xin, X. ve Ren, J. (2017). *Asphalt Modification Using Nano-Materials and Polymers Composite Considering High and Low Temperature Performance*. **Construction and Building Materials**, 133, 358-366.
- Sünneci, M. O. (2015). *Cevizdere (Ünye, Ordu) Yöresi Killerinin Konsolidasyon Parametrelerinin ve Şişme Özelliklerinin Araştırılması*. **Yüksek Lisans Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5-7.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı, (2006). *Türkiye’de Karayolu Taşımacılığı*.  
[http://www.mfa.gov.tr/turkiye\\_de-karayolu-tasimaciligi-.tr.mfa](http://www.mfa.gov.tr/turkiye_de-karayolu-tasimaciligi-.tr.mfa), 22.06.2017.
- Temel, S. (2016). *Doğal Zeolit ve Sentetik Zeolit’in İlık Karışım Asfalt Katkısı Olarak Kullanımı*. **Yüksek Lisans Tezi**, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5.
- TS 120 EN 1427, (2002). *Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilya Metodu*, TSE, Ankara.
- TS EN 12593, (2003). *Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Fraass Kırılma Noktasının Tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 12607-1, (2003). *Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi*, TSE, Ankara.
- TS EN 13398, (2005). *Bitümlü Maddelerin Düktilite Deneyi için Metod*, TSE, Ankara.
- Uncu, D. (2017). *Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi*. **Doktora Tezi**, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1, 4, 16-18, 40, 44, 46-47, 50-52, 55, 57.
- Vargas, M.A., Moreno, L., Montiel, R., Manero, O. ve Vázquez, H. (2017). *Effects of Montmorillonite (Mt) and Two Different Organo-Mt Additives on The Performance of Asphalt*. **Applied Clay Science**, 139, 20-27.

- Wang, S., Wang, Q., Wu, X. ve Zhang, Y. (2015). *Asphalt Modified by Thermoplastic Elastomer Based on Recycled Rubber*. **Construction and Building Materials**, 93, 678-684.
- Wei, J., Liu, Z. ve Zhang, Y. (2013). *Rheological Properties of Amorphous Poly Alpha Olefin (APAO) Modified Asphalt Binders*. **Construction and Building Materials**, 48, 533-539.
- Whiteoak, D. (2004). *Shell Bitüm El Kitabı*, (Çev. A. H. Lav ve M. A. Lav). İstanbul: İSFALT Bilimsel Yayın, 34, 79.
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M. ve Zha, J. (2014). *Effects of Two Biomass Ashes on Asphalt Binder: Dynamic Shear Rheological Characteristic Analysis*. **Construction and Building Materials**, 56, 7-15.
- Xue, Y., Ge, Z., Li, F., Su, S. ve Li, B. (2017). *Modified Asphalt Properties by Blending Petroleum Asphalt and Coal Tar Pitch*. **Fuel**, 207, 64-70.
- Yalçinkaya, S. E. (2008). *Nanokil-Polimer Kompozitlerinin Sentez ve Karakterizasyonu*, **Yüksek Lisans Tezi**, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-11.
- Yang, J. ve Tighe, S. (2013). *A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures*. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, 96, 1269-1276.
- Yan, K., Xu, H. ve You, L. (2015). *Rheological Properties of Asphalts Modified by Waste Tire Rubber and Reclaimed Low Density Polyethylene*. **Construction and Building Materials**, 83, 143-149.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S. H., Lee, C. H., Yap, Y. K. ve Shi, X. (2013). *Rheological Properties and Chemical Analysis of Nanoclay and Carbon Microfiber Modified Asphalt with Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. **Construction and Building Materials**, 38, 327-337.
- Yao, H., Dai, Q. ve You, Z. (2015a). *Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization of Aging-Related Properties of Original and Nano-Modified Asphalt Binders*. **Construction and Building Materials**, 101, 1078-1087.
- Yao, H., Dai, Q. ve You, Z. (2015b). *Chemo-Physical Analysis and Molecular Dynamics (MD) Simulation of Moisture Susceptibility of Nano Hydrated Lime Modified Asphalt Mixtuers*. **Construction and Building Materials**, 101, 536-547.

- Yao, H., Dai, Q., You, Z., Ye, M. ve Yap, Y. K. (2016). *Rheological Properties, Low-Temperature Cracking Resistance, and Optical Performance of Exfoliated Graphite Nanoplatelets Modified Asphalt Binder*. **Construction and Building Materials**, 113, 988-996.
- Yılmaz, B. (2016). *Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması*. **Doktora Tezi**, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1, 19-36, 79-86.
- Yılmaz, M. (2011). *Asfaltın Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 31-32.
- Yoo, P. J. ve Yun, T. (2013). *Micro-Heterogeneous Modification of An Asphalt Binder Using A Dimethylphenol and High-Impact Polystyrene Solution*. **Construction and Building Materials**, 49, 77-83.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q. ve Goh, S. W. (2011). *Nanoclay-Modified Asphalt Materials: Preparation and Characterization*. **Construction and Building Materials**, 25, 1072-1078.
- Yu, J., Feng, P., Zhang, H. ve Wu, S. (2009). *Effect of Organo-Montmorillonite on Aging Properties of Asphalt*. **Construction and Building Materials**, 23, 2636-2640.
- Yusoff, N. I. Md., Breem, A. A. S., Alattug, H. N. M., Hamim, A. ve Ahmad, J. (2014). *The Effects of Moisture Susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer-Modified Asphalt Mixtures*. **Construction and Building Materials**, 72,139-147.
- Zampori, L., Stampino, P. G., Cristiani, C., Dotelli, G. ve Cazzola, P. (2010). *Synthesis of Organoclays Using Non-Ionic Surfactants: Effect of Time, Temperature and Concentration*. **Applied Clay Science**, 48, 97-102.
- Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J. L., Chávez-Cinco, M. Y., Salazar-Cruz, B. A. ve Mendoza-Martínez, A.M. (2016). *Physical and Rheological Properties of Asphalt Modified with SEBS/Montmorillonite Nanocomposite*. **Construction and Building Materials**, 106, 349-356.
- Zhang, F. ve Hu, C. (2013). *The Research for SBS and SBR Compound Modified Asphalts with Polyphosphoric Acid and Sulfur*. **Construction and Building Materials**, 43, 461-468.

Zhang, F., Hu, C. ve Zhang, Y. (2018). *The Research for SIS Compound Modified Asphalt*. **Materials Chemistry and Physics**, 205, 44-54.

Zhang, M., Fang, C., Zhou, S., Cheng, Y. ve Hu, J. (2016). *Modification of Asphalt by Dispersing Waste Polyethylene and Carbon Fibers in It*. **New Carbon Materials**, 31 (4), 424-430.



## ÖZGEÇMİŞ

Havanur Ebru GÜRBÜZ 09.09.1990 tarihinde Bayburt'ta doğdu. İlköğrenimini Bayburt Mahmut Kemal Yanbeğ İlköğretim Okulu'nda ve lise öğretimini Bayburt Lisesi'nde tamamladı. 2009-2010 eğitim-öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı. Daha sonra Çift Anadal Programına kabul edildi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde de eğitimine başladı. 2014 yılında Jeoloji Mühendisliği Bölümünü bölüm birinciliği ile bitirdi. 2015 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı'nda ve Bayburt Üniversitesi (Atatürk Üniversitesi Ortak Program) Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış olan GÜRBÜZ İngilizce bilmektedir.