

**ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLERDEN ELDE
EDİLEN AĞIR LASTİK YAĞI VE NANO KROM OKSİT
İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Mehmet GÜNGÖR**

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR**

**2020
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLERDEN ELDE
EDİLEN AĞIR LASTİK YAĞI VE NANO KROM OKSİT
İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet GÜNGÖR

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2020

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLERDEN ELDE
EDİLEN AĞIR LASTİK YAĞI VE NANO KROM OKSİT
İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR danışmanlığında, Mehmet GÜNGÖR tarafından hazırlanan bu çalışma 23 / 06 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile** kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ATALAY *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

23 / 06 / 2020

İmzası

Mehmet GÜNGÖR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLERDEN ELDE EDİLEN AĞIR LASTİK YAĞI VE NANO KROM OKSİT İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ BAĞLAYICININ REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet GÜNGÖR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR

Karayolları üstyapı katmanlarında ortaya çıkan bozulmalar, hem trafik güvenliği hem de onarım maliyetlerini arttırması nedeniyle, ciddi problemler oluşturmaktadır. Bu problemleri gidermek amacıyla modifiye asfalt üretilmekte ve kullanılmaktadır. Modifiye işlemi, karışım modifikasyonu ve bitüm modifikasyonu olmak üzere iki ayrı biçimde uygulanmaktadır. Dünya genelinde, ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüşüm oranı ve teknikleri giderek artmaktadır. Piroliz yöntemiyle elde edilen lastik yağının ekonomik değeri ve yanıcılık özelliği daha yüksek hafif fraksiyonu olan ürün genelde sıvı yakıt olarak değerlendirilmektedir. İkincil ürün olarak ayrılan yanıcılık özelliği daha düşük ağır lastik yağı ise dizel jeneratörlerde tesislerin elektrik ihtiyaçlarını karşılamada kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen ağır lastik yağı (ALY) ve nano krom oksit (NKO) saf bitümle karıştırılarak, elde edilen modifiye bitümün reolojik özellikleri incelenmiştir. 70/100 penetrasyona sahip saf bitümlü bağlayıcıya, %1ALY+%1NKO, %2ALY+%2NKO ve %3ALY+%3NKO ağırlık oranında ilave edilerek, tüm numunelerin penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR) ve dönel ince film halinde ısıtma deneyleri (RTFOT) uygulanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılan numunelere yine penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri uygulanmış, RTFOT+PAV (basınçlı yaşlandırma kabı) ile yaşlandırıldıktan sonra da giriş eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanarak, bitümlü bağlayıcıların reometre özelliklerindeki değişim gözlemlenmiştir. ALY ve NKO'nun bitümün elastik davranışını bir miktar azalttığı, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı direnci az da olsa düşürdüğü görülmüştür. Performans seviyesini yaşlanmadan önce PG64-28 sınıfında sağlasa da, yaşlandıktan sonra yine şartname sınırları içerisinde kalarak PG70-34 sınıfına değişmiştir. Sonuçta, katkı ilavesinin bitümlü bağlayıcının daha esnek hale gelmesini sağladığı, sıcaklığın düşük olduğu iklim koşullarına sahip bölgelerde ALY ve NKO ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

2020, 93 sayfa

Anahtar Kelimeler: BBR, DSR, RTFOT, PAV, Penetrasyon, Bitüm, Ağır Lastik Yağı, Nano Krom Oksit.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMEN BINDING MODIFIED WITH HEAVY TIRE OIL MADE FROM TIRES COMPLETED SERVICE LIFE AND NANO CHROME OXIDE

Mehmet GÜNGÖR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR

The deterioration in the superstructure layers of highways creates serious problems as they increase both traffic safety and repair costs. In order to overcome these problems, modified asphalt is produced and used. Modification process is applied in two different ways as mixture modification and bitumen modification. The recycling rate and techniques of end-of-life tires are increasing worldwide. The economical value of the rubber oil obtained by the pyrolysis method and the product with higher flammability and light fraction are generally considered as liquid fuel. Heavy rubber oil with lower flammability characteristic, which is reserved as a secondary product, is used in diesel generators to meet the electrical needs of the facilities.

In this study, the rheological properties of the modified bitumen were investigated by mixing heavy tire oil (HTO) and nano chrome oxide (NCO) obtained from end of life tires with pure bitumen. The penetration, softening point, flash point, dynamic shear rheometer (DSR) and rotary thin film heating of all samples are added to the pure bituminous binder with 70/100 penetration by adding %1HTO + %1NCO, %2HTO + %2NCO and %3HTO + %3NCO weight experiments (RTFOT) were applied. The samples aged with RTFOT were again applied with penetration, softening point and DSR tests, and after aging with RTFOT+PAV (pressure aging vessel), the change in the rheometer properties of bituminous binders was observed by applying beam bending rheometry (BBR) tests. It has been observed that HTO and NCO reduce the elastic behavior of bitumen to some extent, and at low temperatures, it decreases the resistance against tire tracks. Although it achieved its performance level in the PG64-28 class before aging, it remained within the boundaries of the specification and changed to PG70-34 class after aging. As a result, it has been determined that the addition of additives allows the bitumen binder to become more flexible, and in areas with climatic conditions with low temperatures, bituminous binders modified with HTO and NCO are available.

2020, 93 page

Keywords: BBR, DSR, RTFOT, PAV, Bitumen, Penetration, Heavy Tire Oil, Nano Chromium Oxide.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında her türlü desteğini ve önerilerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR'a, bölümümüz ulaştırma laboratuvarına vermiş oldukları destekten dolayı Erzurum Teknik Üniversitesi yönetimine, laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan arkadaşım İnşaat Mühendisi Mustafa AKBULUT'a ve bana her zaman ve her konuda destek olan değerli eşim Hande GÜNGÖR ve oğlum Metehan GÜNGÖR'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Mehmet GÜNGÖR
Haziran 2020

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	8
3. MATERYAL ve YÖNTEM	17
3.1 Materyal	17
3.1.1 Bitümlü bağlayıcılar	17
3.1.1.1 Asfalt	17
3.1.1.1.1 Doğal asfalt	18
3.1.1.1.2 Rafineri (Yapay) asfaltı	18
3.1.1.1.3 Asfaltın kimyasal yapısı	20
3.1.1.1.4 Asfaltın sıcaklık etkisi altındaki davranışı	22
3.1.1.2 Bitüm	23
3.1.1.2.1 Bitüm reolojisi	25
3.1.1.2.2 Bitümlü kaplamalarda meydana gelen bozulma ve deformasyonlar	27
3.1.1.2.2.1 Kalıcı deformasyonlar	30
3.1.1.2.2.2 Termal ve yorulma çatlakları	32
3.1.1.2.2.3 Ayrışmalar	34
3.1.1.2.3 Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler	34
3.1.1.2.3.1 Geçirimsizlik (Permabilite)	35
3.1.1.2.3.2 İşlenebilirlik	35
3.1.1.2.3.3 Stabilite	35
3.1.1.2.3.4 Esneklik (Fleksibilite)	36
3.1.1.2.3.5 Durabilite (Dayanıklılık)	36
3.1.1.2.3.6 Yorulmaya karşı mukavemet	37
3.1.1.2.4 Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesinin nedenleri	37

3.1.1.2.4.1 Bitümün modifikasyonunda kullanılan katkıları	39
3.1.1.2.4.2 Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması	40
3.1.2 Nanomalzemeler ve özellikleri	41
3.1.2.1 Nanomalzemelerin elde edilmesi	42
3.1.2.2 Nanomalzemelerin inşaat mühendisliği alanında kullanımı	43
3.1.2.3 Nano krom oksit	44
3.1.3 Ömrünü tamamlamış lastikler	47
3.1.3.1 Piroliz yöntemi	48
3.1.3.2 Pirolizi etkileyen faktörler.....	50
3.2 Yöntem.....	51
3.2.1 Penetrasyon deneyi.....	51
3.2.2 Yumuşama noktası deneyi	52
3.2.3 Parlama noktası deneyi	53
3.2.4 Bitüm özelliklerini belirlemede uygulanan Superpave deneyleri	54
3.2.4.1 Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi.....	54
3.2.4.2 Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deneyi	55
3.2.4.3 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi.....	56
3.2.4.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi.....	57
3.2.4.5 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi	59
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	63
4.1 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılacak Numunelerin Hazırlanması.....	63
4.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları	64
4.3 Parlama Noktası Deneyi (Cleveland Açık Kap Metodu) Sonuçları.....	66
4.4 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	68
4.5 Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi Sonuçları.....	71
4.6 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları.....	73
4.7 Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları.....	73
4.8 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları.....	77
4.9 Bitümlü Bağlayıcıların PG Sınıflarının Belirlenmesi	79
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°	Derece
%	Yüzde
B	Kiriş Uzunluğu
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
dk	Dakika
d/d	Devir/dakika
dmm	Desimilimetre
G	Kayma Modülü
G*	Kompleks Kayma Modülü
gr	Gram
h	Kiriş Kalınlığı
Hz	Hertz (Devir/saniye)
km	Kilometre
km/sa	Kilometre/saat
kPa	Kilopascal
L	Mesnetler Arası Uzaklık
log	Logaritma
m	Sünme Oranı
mN	Milnewton
MPa	Megapascal
M ₁	Yaşlanmadan Önceki Ağırlık
M ₂	Yaşlanmadan Sonraki Ağırlık
ml/dk	Mililitre/dakika
mm	Milimetre
nm	Nanometre
P	Uygulanan Sabit Yük
Pa.s	Pascal-saniye
Pen	Penetrasyon

rad	Radyan
$S_{(t)}$	t Anındaki Sünme Sertliği
T	Tork
$\delta_{(t)}$	t Anındaki Yer Değiştirme
δ	Faz Açısı
τ	Kayma Gerilmesi
γ	Kayma Deformasyonu
θ	Dönme Açısı

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği
AC	Asfalt Çimentosu
ALY	Ağır Lastik Yağı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BBR	Kiriş Eğme Reometresi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	Dinamik Kesme Reometresi
DTT	Doğrudan Çekme Deneyi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LASDER	Lastik Sanayicileri Derneği
NKO	Nano Krom Oksit
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastik
PAV	Basıncılı Yaşlandırma Kabı
PC	Petro-Canada
PG	Performans Derecesi
PI	Penetrasyon İndeksi
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
SBS	Polistiren ve Polibütadien Esaslı Polimerler
SBSMA	Polistiren ve Polibütadien Esaslı Polimer Modifiye Asfalt
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
TS	Türk Standartları
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Ham petrolün damıtılması ile elde edilen ürünler.....	19
Şekil 3.2 Asfalt molekül çeşitleri	21
Şekil 3.3 Bitüm.	23
Şekil 3.4 Bitümü oluşturan kimyasallar	24
Şekil 3.5 Kayma hızına bağlı akışkan davranışı	26
Şekil 3.6 Elastik katıların gerilme- şekil değiştirme eğrisi	27
Şekil 3.7 Maxwell modeli	27
Şekil 3.8 Dört elemanlı Burger modeli	28
Şekil 3.9 Üstyapı performans eğrisi.	30
Şekil 3.10 Yapısal tekerlek izi oluşumu.....	31
Şekil 3.11 Akma tekerlek izi oluşumu	31
Şekil 3.12 Aşınma ve konsolidasyon tekerlek izi oluşumu	32
Şekil 3.13 Kenar çatlakları, Termal çatlaklar, Blok çatlaklar, Timsah sırtı çatlaklar	33
Şekil 3.14 Krom	45
Şekil 3.15 Nano krom oksit tozu.....	46
Şekil 3.16 Ömrünü tamamlamış lastikler.....	47
Şekil 3.17 Piroliz ünitesi	49
Şekil 3.18 ÖTL'in piroliz işleyiş şeması.....	49
Şekil 3.19 RTFOT deney aleti dış görünüş, RTFOT deney aleti iç görünüş	56
Şekil 3.20 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney aleti	57
Şekil 3.21 Sünme oranının (m-değer) belirlenmesi grafiği.....	58
Şekil 3.22 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti	59
Şekil 3.23 Dinamik kayma (Kesme) reometresi deney (DSR) aleti	60
Şekil 3.24 DSR deneyi işleyişi.....	60
Şekil 3.25 Viskoelastik davranış grafiği.....	61
Şekil 4.1 Deneyde kullanılan nanokromoksit (a) ve ağır lastik yağı (b).....	63
Şekil 4.2 Deney numunelerin hazırlanışı	64
Şekil 4.3 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının penetrasyon değerlerinin değişimi.....	65
Şekil 4.4 Penetrasyon deneyi yapılışı	66
Şekil 4.5 Parlama noktası deneyi yapılışı	67

Şekil 4.6 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının parlama noktası değerlerinin değişimi.....	68
Şekil 4.7 Yumuşama noktası deneyi yapılışı	69
Şekil 4.8 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının parlama noktası değerlerinin değişimi.....	70
Şekil 4.9 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının p ₁ değerlerinin değişimi	71
Şekil 4.10 RTFOT numuneleri (a) ve deneyin yapılışı (b).	71
Şekil 4.11 DSR deneyinin yapılışı	76
Şekil 4.12 Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önceki ve RTFOT ile yaşlandırıldıktan Sonraki $G^*/\sin\delta$ sınır değerlerinin sağlandığı sıcaklık grafiği	76
Şekil 4.13 BBR Deney numunelerinin hazırlanması	78
Şekil 4.14 BBR deneyinin yapılışı	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Elektrik yüklerinin hareketine göre emülsiyon sınıfları	20
Çizelge 3.2 Emülsiyon sınıfları.....	20
Çizelge 3.3 Bitüm modifiyesinde kullanılan katkı türleri ve değiştirdiği özellikler.....	40
Çizelge 3.4 Bitüm mofiyesinde kullanılan maddelerin sınıflandırılması.....	41
Çizelge 3.5 Yapı alanında kullanılan nanomalzemeler ve faydaları.....	44
Çizelge 3.6 Piroliz yöntemleri ve elde edilen ürünler.....	50
Çizelge 4.1 Penetrasyon deney sonuçları.....	65
Çizelge 4.2 Parlama noktası deney sonuçları.....	67
Çizelge 4.3 Yumuşama noktası deney sonuçları.....	69
Çizelge 4.4 Penetrasyon indeksi sonuçları.....	70
Çizelge 4.5 Bağlayıcıların RTFOT ile yaşlandırma sonrası kütle kayıp oranları	72
Çizelge 4.6 Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önceki ve RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonraki G^* ve $\sin\delta$ değerleri.....	75
Çizelge 4.7 Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR) sonuçları.	79
Çizelge 4.8 Katkısız ve modifiye bitümlü bağlayıcıların PG sınıflandırma çizelgesi	80

1. GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de asfaltın ana kullanım alanı ağırlıklı olarak karayollarıdır. Asfalt, içeriğindeki temel bileşenler sayesinde, bitüm ve bitümlü bağlayıcılar, çeşitli katkı maddeleri, soğuk karışımlar, bitümlü sıcak karışımlar ve sathi kaplamalar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Uygulama ve üretim için gerekli araç-gereçler ile birlikte de önemli endüstri dallarından biri olarak değerlendirilebilir (Anonim 2007).

Asfalt yaklaşık 5.000 yıldır kullanılan ve bu zaman zarfı içerisinde kendini kanıtlamış inşaat malzemelerinden biridir. İlk zamanlar natürel malzemelerden elde edilen asfalt, geçirimsizlik özelliği nedeniyle kaplamalarda ve harç malzemesi olarak da kullanılmaktaydı. Uzun yıllardır da geçirimsizlik özelliği sayesinde bir kaplama malzemesi olarak pek çok alanda kullanılmaya devam etmektedir. Asfaltla inşa edilen yolların geçmişi yaklaşık 100 yıl kadar eskiye uzanmaktadır. İlk zamanlarında bağlayıcı kullanılmaksızın inşa edilen yüzey katmanı üzerinde ilerleyen araçların sebep olduğu tozu önlemek için kullanılmaktaydı. İlk kullanılan asfalt karışım plenti de 1920 ila 1930 yılları arasında faaliyete başlamıştır (Anonim 2009).

Ülkemizde ilk kez asfaltın uygulanması Fransızlardan destek alınarak Osmanlı Devleti döneminde başlayıp, penetrasyon-makadam kaplamaları yapımında kullanılmıştır (Anonim 2009). 1950 yılında 9.500 km civarında olan karayolu ağıımız, 01.01.2019 tarihi itibarıyla 24.430 km'lik kısmını bölünmüş yollar teşkil etmek üzere toplamda 67.333 km'ye ulaşmıştır (Anonim 2019a). Bölünmüş devlet ve il yollarının yaklaşık %36'sı Bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları ile kaplıdır. Karayollarında yapılan yolcu ve yük taşımacılığı, otomotiv sektörünün de büyüyüp gelişmesiyle her geçen gün artarak, talep ve ihtiyaçlara cevap verebilmesi açısından bu konudaki hedef ve stratejilerin de değişmesini kaçınılmaz kılmıştır.

Bölünmüş ve çok şeritli yolların inşa edilmeye başlanmasıyla, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yardım ve teşvikleriyle çok sayıda müteahhit ve girişimci bitümlü sıcak karışım uygulama ve üretimine yönelik ekipman ve makine alanları oluşturup, faaliyet kollarına asfaltı da eklemişlerdir. Bu sayede ülkemizde de otoyol ağının ve asfalt endüstrisinin gelişimi çalışmaları başlamış ve büyümüştür.

Gelişip büyüyen karayolu ve asfalt endüstrisi, gün geçtikçe daha ağır ve yoğun trafik yükünün karayollarında neden olduğu kalıcı deformasyon, yıpranma ve dayanıklılık süresi açısından olumsuz yönde etkilenmektedir. Daha yüksek performanslı ve konforlu olmanın yanı sıra bakım maliyetlerinin de minimuma indirilmesi için asfaltın özelliklerinin, her türlü hava ve iklim koşullarında kullanılabilirliğini sağlayacak düzeyde olması gerekmektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, insan sağlığını korumak ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla, kullanılmış ürün ve malzemelerin geri dönüşümü konusunda ciddi yatırımlar yaparak tesisler inşa etmekte ve ekonomik olarak da pozitif kazanımlarda bulunmaktadır. Kullanılmış lastikler de içeriğinde bulunan petrol türevi ve çeşitli kimyasal maddeler ile geri dönüşümündeki zorluklar nedeniyle doğaya ve insan sağlığına karşı tehdit oluşturmaktadır. Araç üzerindeki ekonomik kullanım süresini doldurduğu belirlenerek araçlardan çıkan orijinal ya da kaplama işlemi görmüş ve bir daha araçlarda kullanılması mümkün olmayan lastiklere “Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL)” denir (Anonim 2020a).

Ülkemizde “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” 25.11.2006 tarihli ve 26357 Sayılı Resmî Gazetede yayımlandıktan sonra 01.01.2007 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmelikte, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın, Belediyelerin, Lastik Üreticilerinin, Kaplamacıların, Geri Kazanım Tesislerinin, Yetkili Taşıyıcıların ve Geçici Depo İşletenlerin yükümlülük ve yetkileri ayrı ayrı belirtilmektedir. Bu yönetmeliğe göre, kullanım süresini doldurmuş lastiklerin, doğaya zarar verebilecek şekilde direk ya da dolaylı şekilde alıcı ortama verilmesinin engellenmesi, geri dönüşümü ya da yok edilmesi amacıyla toplama ve transfer sisteminin kurulması, yönetim planı oluşturulması ve kullanım süresini doldurmuş lastiklerin yönetilmesinde gerekli düzenleme ve standartların teşkil edilmesi amacıyla gerekli olan prensip ve programların belirlenmesine dair usul ve esasları belirleme yetkisi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’na verilmiştir. Yetkili Bakanlık, ÖTL’lerin çevreyle adapte yönetimini sağlamak amacı ile üreticilerin sorumlulukları çerçevesinde kota uygulamayı mecbur kılmaktadır. Bu zorunluluk kapsamındaki üretici firmalar, her sene, bir öncekine göre iç pazara arz edilen lastik ağırlığını dikkate alarak, Yönetmeliğin yürürlüğe alındığı ilk yılda %30, takip eden yıllarda ise %35, %40, %45 ve beşinci yılda ise %50, devam eden yıllarda da Bakanlığın ortalama lastik aşınma

oranını dikkate alarak belirleyeceği orandaki ÖTL'leri toplamak ve toplattırmak, toplanmış olanların geri kazanımı veya yok edilmesini ifa etmek ve bu uygulamaları Bakanlığa belgeleyerek bildirmek ile yükümlüdür. Yönetmelikte, geri dönüşüm ve yok etme süreçlerinin, havaya, suya, toprağa, bitkilere ve hayvanlara karşı herhangi bir tehlike oluşturmadan, kokacak ve yüksek ses çıkarmadan çevrede herhangi bir olumsuzluğa yol açmadan ve doğal çevreyle korumakta olan alanlara zarar vermeyecek şekilde yapılmasının zorunlu olduğu ve ÖTL'lerin geri kazanımının esas olduğu belirtilmektedir (Anonim 2006).

Ömrünü tamamlamış ya da kusurlu üretilmiş araç lastiklerinin geri dönüşümünde Piroliz (Yüksek ısıda geri kazanım) yöntemi kullanılmakta ve bu yöntemle %100'e yakın oranda geri dönüşüm sağlanmaktadır. Bu yöntem kimyasal olmayan bir teknik olduğundan çevreye ve doğaya herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamakta, ayrıca süreç sonunda elde edilen tüm ürünler tekrar kullanılabilir özellikte ve depolanması daha kolay olabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen ve yüksek kalori değeri olan pirolitik yağlar, olduğu gibi kullanılmakla beraber bir rafinaj işlemi sonrasında mazot ve benzeri akaryakıt olarak da kullanılabilir (Anonim 2020b).

Çok çeşitli ham maddeler kullanılarak üretilen lastiklerin yapımında 200'e yakın bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenler 5 ana başlıkta şöyledir, doğal kauçuk, sentetik kauçuk, karbon karası ve silis, metal ve tekstil teller ile lastikten istenilen özelliklere göre değişkenlik gösteren silika ve antioksidanlar gibi birçok kimyasal etken madde bulunmaktadır (Anonim 2014). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2018 istatistiki verilerine göre Türkiye genelinde toplam kayıtlı motorlu kara taşıtları sayısı 2018 yılında 22 milyon 850 bin iken, 2020 yılının Nisan ayında ise bu sayı 23 milyon 398 bin 837 olmuştur. Bu kapsamda araç lastiklerinin pazar payı da bir o kadar artmıştır (Anonim 2020g).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın açıkladığı verilere göre 2015 yılında yenileme pazarında 315 bin ton lastik piyasaya sürülmüştür. Bu miktarın yaklaşık %60'lık kısmı Türkiye Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER) üyelerinin yenileme pazarına sattığı miktardır. LASDER her yıl 100 bin tondan fazla, kota miktarı kadar ÖTL'yi Türkiye genelinde toplayıp geri kazanılmasını sağlamaktadır (Anonim 2020a). Bu bilgiler ışığında ömrünü tamamlamış lastiklerin doğa ve insan sağlığı için önemli bir sorun

oluşturduğu görülmektedir. Limbachiya and Roberts (2004) lastikler kullanılamaz hale geldiklerinde atılması ve uygun bir işlemle bertaraf edilmesinin zorunlu olduğunu belirtmektedirler.

Ayrıca, üretici ya da yurt dışından ÖTL temin eden firmalara, piyasaya sundukları lastiklerin ağırlık olarak %80 oranındaki miktarını toplayıp geri dönüşüme dâhil etme yükümlülüğü ekonomiye kayda değer bir katkı sağlamıştır. Bu kapsamda son 10 yıl içerisinde toplanmış olan ömrünü tamamlamış lastiklerden ülke ekonomisine 312 milyon lira katkı sağlanmıştır. Şirketler namına lastik geri dönüşümüne Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nca yetkili kılınan LASDER, son 10 yıl içinde iç pazardan 720 bin tonun üzerinde ömrünü tamamlamış lastikleri toplamıştır. Bunların toplanabilmesi için yüklenicilere LASDER tarafından yaklaşık 130 milyon lira ödeme yapılmıştır. Sektörde her yıl doğrudan veya dolaylı olarak 2 binden fazla kişiye iş imkânı sağlanmıştır. Çimento fabrikalarında kullanılmak üzere kömüre ilave olarak yakılan ömrünü tamamlamış lastiklerden de yaklaşık olarak 52 milyon lira tasarruf sağlanmıştır. Buna ek olarak kömüre ilave yakıt olarak lastiklerin kullanılması sayesinde havaya 96 bin ton civarında karbondioksit daha az salınmış ve hava kalitesine pozitif etkide bulunulmuştur. Toplanan lastiklerden 480.000 tonu parçalanıp granül boyutuna getirilerek, futbol sahalarında suni zemin malzemesi ya da çocuk oyun alanlarında yumuşak taban malzemesi şeklinde kullanılmış olup 240.000 ton lastik de çimento sektöründe ilave yakıt olarak sunulmuştur. Böylelikle doğaya bırakıldığında çok çok uzun sürede ayrışabilecek ömrünü tamamlamış lastikler hem çevre hem de ülkemiz ekonomisine değerli katkılar sağlamıştır (Anonim 2018a).

Deneyisel çalışmalarda kullanılan katkı maddelerinin temin edildiği Erzincan OSB'de bulunan ERA Çevre Teknolojileri A.Ş. yaptığı piroliz işlemi sonucunda Ömrünün Tamamlamış Lastikten yaklaşık, %30-32 yağ, %30 karbon siyahı , %25 ince-kalın çelik tel, %13-15 gaz elde edildiğini, yağın ise ayrıştırma kuleleri ve kondenserlerden çıkarak yoğuşan, %70 ağır ürün, yoğuşmadan çıkan %30'unun ise hafif ürün olduğunu belirtmiştir (Köylü 2019). Elde edilen ağır ve hafif yağlar ısı üretmek amacıyla brülörlerde ve dizel jeneratörlerde elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Kromun doğada iktisadi olarak işlenebilmesini sağlayan sadece Kromit mineralidir. Basit mineral formülü ise FeCr_2O_4 'tür. Metalurji alanında krom cevherinin kullanıldığı en değerli alan paslanmaz çelik yapmakta kullanılan ferro-krom işlemesidir. Dünyadaki krom üretiminden, %79 ile metalurji alanında, %13 ile kimya sektöründe ve %9 ile de refrakter (yüksek ısıya dayanıklılık) sektöründe yararlanılmaktadır. Sanayide kullanılışı kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri nedeniyle sınırlı olmakla birlikte, teknolojik gelişmeler bu özellikleri nedeniyle ortaya çıkan sınırlamaları daha esnek hale getirmiştir. Dünyadaki kromit kaynakları yaklaşık 7,6 milyar tondur. Bu miktarın ise 3,6 milyar tonluk kısmı rezervdir (Anonim 2020c).

İktisadi şekilde işlenebilecek krom cevheri yatakları dünya genelinde; Güney Afrika, Kazakistan, Zimbabve, Finlandiya, Hindistan, Türkiye, İran, Filipinler, Küba ve Brezilya'da mevcuttur. Dünya genelinde üretilen krom rezervi yıllık 13 ile 15 milyon ton civarındadır. Ülkemizde krom madenciliğine başlanması 1850'li yıllarda olmuştur. Ülkemiz, günümüze dek dünyadaki krom sektöründe önemli bir pazar payına sahip olmuştur. Üretim açısından bazen 1. sırada bulunmuş, çoğunlukla da yıllık bazda 3 ile 6. sıralardaki yerini korumasını bilmiştir. Günümüze dek Türkiye'de yaklaşık 47 milyon ton krom cevheri işlendiği hesaplanmaktadır. Krom cevheri üretimi ülkemizde 2.080.043 ton ile 1995 yılında en üst seviyeye çıkmıştır. Krom yataklarının içinde bulunduğu ultra bazik kayalar, ülkemiz sınırları içerisinde geniş alanları kaplamaktadır. Türkiye'deki krom yatakları, düzenli bir şekilde olmaksızın ülke geneline dağılmış haldedir. Türkiye'de sayısı 1.000'i bulan tekil veya gruplar şeklinde krom yatağı ve krom cevheri zuhurları mevcuttur. Coğrafi açıdan krom yatakları 6 bölgede yoğunlaşmıştır. Bunlar, Guleman (Elazığ), Fethiye-Köyceğiz-Denizli civarı, Bursa-Kütahya-Eskişehir civarı, Mersin-Adana-Kayseri civarı, Sivas-Erzincan-Kopdağı ile İskenderun-Kahramanmaraş dolaylarındadır (Anonim 2020c).

Krom oksit yeşil kristalcikler halinde bulunur. Moleküler formülü Cr_2O_3 , Yoğunluğu $5,22 \text{ g/cm}^3$, mol ağırlığı 152 gr ergime sıcaklığı 1.990°C 'dir ve suda çözünmez özelliğe sahiptir. Tozu asit ve alkaliler içinde çözünürlüğe sahiptir. Günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip krom oksit, 1802 yılına dek bilinmemekteydi. Krom oksit ilk defa Sevr'de kullanılmıştır. Krom oksit kullanılarak üretilen ilk pigment koyu yeşil idi. Sonraki zamanlarda krom kalay pembesi İngiltere'de kullanılmıştır. Krom oksit, esas olarak sırları krom yeşili denen renge boyar. Krom

oksidin alüminyum ya da silikonla reaksiyona girmesi sonucu krom metali elde edilmektedir. Düşük sıcaklık seviyelerinde %1 oranında eklenmesiyle bol kurşunlu olan asidik sırlarda sarı renk tonları elde edilmektedir. SiO₂ oranı arttığında krom kırmızısı sırlarda kahverengiden yeşile dek renk değişimlerine sebep olmaktadır. Kullanıldığı alan olarak da, mürekkep sektöründe kâğıt paraların baskı mürekkebi üretiminde katkı maddesi olarak kullanılır. Boya üretiminde ise renklendirici özelliği nedeniyle kullanışlıdır. Seramik sektöründe, deri ve yapı malzemeleri üzerine boyama maddesi olarak da kullanılmaktadır. Birçok değişik alanda kullanılan bu madde metal krom eritmek için de kullanılmaktadır. Krom karbür ve organik sentetik krom analizlerinde katalizör olarak seçilebilmektedir. Krom, çeliğin paslanmaz özellik kazanabilmesi için en gerekli elementtir. Oksijen ile temas etmesi durumunda ince bir film tabakası oluşturur. Krom oksit tabakasını teşkil eden bu element, çelik ile oksijen temasının engellenmesini sağlar. Böylece çelik paslanmaya karşı çok daha dayanıklı olur. Çeliğin ihtiva ettiği krom oranını arttırdığımızda, çelik korozyona karşı aynı ölçüde dayanıklılık kazanır. Ayrıca, bu katmanın herhangi bir sebeple zedelenmesi, açılması ya da çizilmesi halinde oluşabilecek açıklık, çok seri bir biçimde katmanın kendini yenilemesi sayesinde tekrar oluşabilmektedir. Buna pasivasyon denilir ve titanyum benzeri diğer metallerde de görülebilmektedir (Anonim 2019b).

Ülkemizde hem trafik güvenliği açısından, hem de onarım maliyetlerini arttırması nedeniyle, karayolları üstyapı katmanlarında ortaya çıkan temel bozulma çeşitlerinden plastik deformasyonlar (ondülasyon, tekerlek izi oluşumu, yorulma v.s.) ciddi problemler oluşturmaktadır. Bu gibi problemleri gidermek amacıyla modifiye asfalt üretilmekte ve kullanılmaktadır. Esnek üstyapı kaplamalarındaki, sıcak karışım uygulamalarında ortaya çıkan en önemli bozulma şekilleri, yorulmadan kaynaklı çatlaklar, termal çatlaklar, tekerlek izi oluşumları ve diğer kalıcı deformasyonlar olmaktadır. Bu gibi bozulmaların en temel sebepleri karayollarında yinelenen ağır trafik yükleri, iklim koşullarının yıl içerisinde büyük farklılıklar göstermesi, bölgesel iklim değişikliklerinin bitümlü sıcak karışımlar tasarımında ve bağlayıcı tipini belirlemede fazla dikkate alınmaması ve karışım özelliklerinin ihtiyacı karşılayamamasıdır. Karayolu üstyapı katmanında ortaya çıkan bu gibi bozulmaları engelleyebilmek için yapılan Modifiye işlemi; karışım modifikasyonu ve bitüm modifikasyonu olmak üzere iki ayrı biçimde olabilmektedir. Bu amaç için de çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır (Anonim 2017).

Bu çalışmada Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden elde edilen ağır lastik yağı (ALY) ve Nano Krom Oksit (NKO), 70/100 penetrasyonlu saf bitümle karıştırılarak modifiye edilip, modifiye bitümün reolojik özellikleri incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ülkemizde ve Dünya genelinde sürekli artan araç sayısı ve trafik yükü ile birlikte trafik ve esnek üstyapı problemleri de aynı oranda artmaktadır. Meydana gelen bu problemlerin çözümü için gün geçtikçe yeni çalışmalar ortaya çıkmaktadır. Esnek üst yapı sorunlarının çözümü ve bakım maliyetlerinin azaltılması için, Modifiye Bitüm çalışmaları da son yıllarda gelişen teknoloji ve yeni metotlarla birlikte artmıştır. Modifiye Bitüm katkısı olarak, polimer malzemeler, atık malzemelerden elde edilen ürünler, elastomerler, lifler, kayaç tozları ve çeşitli kimyasalların yanı sıra oksit malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda ömrünü tamamlamış lastik yağı kullanılarak yapılmış modifiye bitüm çalışmaları sınırlı olsa da, oksit tozları kullanılarak yapılan çalışmalar nispeten daha fazladır.

Roy et al. (1999) yaptıkları çalışmada, atık lastikten piroliz yolu ile elde ettikleri lastik yağını yüksek sıcaklıklarda ayrıştırarak, farklı fraksiyonlara ayrılmış olan lastik yağının en ağır olanını ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) vakum yoluyla elde etmiştir. Bu ürün ise toplam lastik yağının ağırlıkça %29'unu oluşturmaktadır. Elde edilen bu malzemenin de yol kaplamalarında bir bağlayıcı ya da modifiye edici olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Yaptığı deneysel çalışmada ise modifiye bağlayıcının penetrasyonunun arttığını, yumuşama noktası değerinin azaldığını ve düşük bir dinamik viskoziteye sahip olduğunu tespit etmiştir. $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 120 dk süreyle ısıtılan petrol bitümünün kütle kaybı %2,84 Pirolitik bitümün %9,81, petrol bitümüne %10 oranda eklenmiş bağlayıcının kütle kaybı ise %1,15 olarak bulunmuştur.

Chaalal et al. (1999) çalışmasında otomobil parçalayıcısından çıkan kalıntıların vakum pirolizi yöntemiyle elde ettiği pirolitik yağı modifiye katkısı olarak kullanmıştır. PC (Petro-Canada) (85/100) penetrasyonlu bitüme %5, %10, %15 ve %30 oranlarında karıştırarak numuneler hazırlamıştır. Modifiye katkısı olarak kullanılan pirolitik yağ, penetrasyonu artırıp yumuşama noktasını ise düşürmüştür ve bitüme daha esnek bir yapı kazandırmıştır. En iyi performans sonucunun alındığı optimum katkı miktarını %10 olarak belirlemiştir.

Xiao and Li (2006) nano ZnO ve Stiren– Butadien– Stiren (SBS) ilave ederek elde ettiği modifiye bağlayıcının, yüksek ve düşük sıcaklıklardaki davranışını olumlu yönde etkilediğini ve SBS ile nano ZnO arasında kimyasal bağın kurulduğunu belirtmişlerdir.

Ye and Chen (2009) yaptıkları çalışmada, saf bitüme katkı maddesi olarak nano boyutta %0,5 Silisyumdioksit ($n\text{-SiO}_2$) ve %0,5 Titanyumdioksit ($n\text{-TiO}_2$) eklemiş, elde ettikleri modifiye bağlayıcının penetrasyonunda düşüş, yumuşama noktasında ve tekerlek izi dayanım parametresinde artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Taşcı (2010) çalışmasında, karbon siyahı ve lastik yağı katkılı karışımlarla modifiye edilen bitümün, yumuşama noktası değeri azalmış, penetrasyon derecesi artmıştır. Ayrıca atık lastik yağı, bitümün yaşlanma etkisini de azaltmıştır. Bitümün Performans (PG) sınıfı ise PG 64-22'den PG 58-28'e değişmiştir. Orijinal ve atık lastik yağı katkılı bitümlü bağlayıcılar kullanılarak Marshall deneyi yapmış, kullandığı katkı, kaplama numunesinin stabilite oranını düşürmüştür. Bağlayıcı oranını %4 seçtiğinde akma (deplasman) değeri düşmüş, bu da kaplamanın plastik deformasyonlara karşı daha dayanıklı olacağını göstermiştir. Akma değerindeki bu düşüş, malzemeyi daha gevrek hale getirse bile bulunan değer şartname limitleri içerisinde kalmıştır.

Sun et al. (2011) piroliz yöntemi sonucu elde edilen lastik yağının ağır fraksiyonunu kullanarak, 60/80 penetrasyonlu saf bağlayıcıya %1, %2, %3 ve %4 oranında ekleyerek modifiye bitüm numunelerini incelediği çalışmada, karıştırma sıcaklığının ve süresinin artmasıyla penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının arttığı ve bitümün yaşlandığını tespit etmişlerdir. Katkı malzemesi oranının artmasıyla modifiye bağlayıcının yumuşama noktasının düştüğü, penetrasyonunun arttığı ve mükemmel süneklik gösterdiği sonucuna varmışlardır. Uygun modifikasyon koşullarının %1 katkı oranı ilavesiyle, 140-160 °C sıcaklıkta, 2.000 d/d hızda 10 dakika boyunca karıştırmak olduğunu belirlemişlerdir.

Arabani et al. (2012) katkı maddesi olarak nano SiO_2 kullandığı modifiye bitüm çalışmada RTFOT ile yaşlandırdığı numunelere yüksek miktarda ilave edildiğinde yorulma ömrünün ve yumuşama noktasının azaldığını, penetrasyon derecesinin arttığını tespit etmişlerdir.

Tanzadeh et al. (2013) yaptıkları çalışmada modifiye katkı maddesi nano TiO₂ kullanmış, çalışmasının sonucunda esnek üst yapıda dinamik yüklerden kaynaklı oluşabilecek tekerlek izi oluşumlarını azaltabileceğini tespit etmişlerdir.

Shafabakhsh et al. (2014) nano TiO₂ ekleyerek yaptıkları modifiye bitüm çalışmasında, iyileştirmeyi sağlayan optimum oranın %5 olduğunu belirlemişlerdir. Bağlayıcının yumuşama noktasında, duktilite ve vizkozite değerlerinde artış, penetrasyon değerinde ise azalış meydana geldiğini ve bitümün fiziksel olarak daha sert yapıya kavuştuğunu belirlemişlerdir.

Lorasokkay (2014) piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış atık lastikle modifiye edilen bitüm üzerinde yaptığı çalışmada, piroliz sonunda elde edilen prolitik yağı, distile ederek 4 ayrı ürün ortaya çıkarmıştır. Distilasyon sonunda elde edilen ürünlerden en ağır olanını bitümü modifiye etmede kullanmıştır. 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ağırlığının %2, %4 ve %6 oranlarında ekleyerek modifiye bitüm elde etmiştir. Yapmış olduğu deney sonuçlarına göre, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon ve duktilite değerlerinde artış, yumuşama noktasında ise azalış meydana gelmiştir. Bunun sonucunda da bitümün esnekliğinin ve sıcaklık hassasiyetinin arttığını belirlemiştir. DSR deneyi sonuçlarına göre ise katkı oranı arttıkça tekerlek izine karşı dayanımın azaldığı sonucunu elde etmiştir. Marshall stabilite deney sonucuna göre de kullanılan katkı maddesinin uzun süreli yaşlanma etkilerini azalttığı sonucuna ulaşmıştır.

Hamed et al. (2015) nano malzemelerin kullanımının BSK'nın nem hasarı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine yaptıkları çalışmada, Nano-CaCO₃ (Kalsiyum Karbonat) kullanarak, 60/70 penetrasyonlu saf bitüme ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında ekleyerek modifiye bitüm numuneleri hazırlamıştır. Deney için hazırladığı numuneleri yüksek dönme hızına sahip ve sıcaklık kontrollü bir "nano parçacık dağıtıcı" cihazı kullanarak 140-150 °C'de 14.000 d/d karıştırma hızında 4-5 dakika boyunca karıştırarak hazırlamıştır. Çalışmanın sonucunda ise Nano-CaCO₃ içeren karışımların nem hasarına karşı daha dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhang et al. (2015) yaptıkları çalışmada, nano ZnO kullanarak elde ettikleri modifiye bağlayıcının yaşlanma etkilerini incelemiş, bitümün UV ışınlamıyla meydana

gelecek yaşlanma davranışında azalma meydana geldiğini, viskozite indeksi değişiminin de saf bitüme nazaran daha az olacağını belirlemişlerdir.

Hamedi et al. (2016) nano çinko oksit ile modifiye edilmiş asfalt karışımının nem hasarının tahmin edilmesi çalışmasında, 60/70 penetrasyonlu saf bitüme %2 ve %4 oranında Nano-ZnO ekleyerek yaptığı deneysel çalışmada, penetrasyonu azaltıp yumuşama noktasının, sünekliğin ve parlama noktasının arttığını belirlemiştir. Deney numunelerini yüksek dönme hızına sahip ve sıcaklık kontrollü bir "nano parçacık dağıtıcı" cihazı kullanarak 140 °C'de 14.000 d/d karıştırma hızında 4-5 dakika boyunca karıştırarak hazırlamışlardır. Nano-ZnO modifiyesinin nem koşullarında asfalt-agrega bağına güçlendirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Nejad et al. (2016) Nanopartiküllerin sıcak karışım asfaltın rutting davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması çalışmasında, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve ZnO nano partiküllerini %2, %4 ve %6 oranlarında saf bitüme ekleyerek modifiye bitüm elde etmiştir. Nano parçacıkların homojen dağılımı önemli olduğundan, yüksek dönme hızında ve sıcaklık kontrol odasına sahip bir "nanoparçacık dağıtıcı" cihazı kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcı, nanopartiküller ile 120–150 °C ve 28.000 d/d dönme hızında, 20-30 dakika karıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, Nanopartikülleri baz asfalt bağlayıcısına ilave ederek parlama noktası, süneklik, viskozite ve yumuşama noktası artmış ve penetrasyon derecesi azalmıştır. Bu eğilim, yüksek sıcaklıkta biriken kopmaya karşı asfalt bağlayıcısının daha iyi mukavemet göstermesine neden olur. Düşük stres yoğunluğu (150 kPa) ile yüklemde, ZnO nano parçacıkları içeren numuneler, asfalt karışım numunelerinin çekmeye karşı azalan potansiyellerinde daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak, uygulanan dört nano parçacığın tamamı, nano parçacık içermeyen asfalt karışım numunelerine kıyasla asfalt karışım numunelerinin rutting olasılığını azaltmıştır.

Günay (2016) nano malzemelerin bitümlü bağlayıcılarda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelediği çalışmasında, nano boyutlu malzemelerin bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasını amaçlamıştır. Bu doğrultuda, nanokil, nano titayum oksit (TiO₂), nano silisyum oksit (SiO₂), nano çinko oksit (ZnO), nano alüminyum oksit (Al₂O₃), nano magnezyum oksit (MgO), sepiolite kili nano fiber, halloysite nano tüp olmak üzere toplam 8 adet katkı maddesini B 50/70

sınıfı saf bitüme %2, %3 ve %4 oranlarında B 50/70 penetrasyonlu saf bitüme ekleyerek 24 adet nano katkılı bağlayıcı hazırlamıştır. Aynı nano katkı türlerinin stiren-butadien-stiren (SBS) polimeriyle bir arada bitüm içerisinde kullanılmasıyla nanokompozit katkılı bağlayıcılar elde etmiştir. Çalışmasının sonucunda, nano katkı malzemeleriyle hazırlanan bağlayıcıların bitümde meydana gelen yaşlanma etkilerini azalttığını, sertliği arttırdığını, nano katkılı modifiye bağlayıcıların, SBS polimerleri gibi elastik özelliği arttıran malzemelerle beraber kullanılması gerektiğini, aksi takdirde, elastik özelliği az olan bağlayıcıların yüklemenden sonra kalıcı deformasyonunda sürekli şekilde artış olmakta ve dolayısıyla da tekerlek izi gibi bozulmaların meydana gelebileceğini belirtmektedir.

Rezaei et al. (2017) Nano-SiO₂ (Silisyum Dioksit) ve SBS (Stiren – Butadien – Stiren) Polimer kullanarak sıcak karışım asfaltın yüksek sıcaklık performansını incelemek için yapmış oldukları modifiye bitüm çalışmasında, 60/70 olarak adlandırılan PG 64-16 performans sınıfındaki TPOC (Tahran Pasargad Oil Co.) bitümüne, ağırlıkça %4,5 SBS, %4,5 SBS + %1 n-SiO₂ ve %4,5 SBS + %3 n-SiO₂ oranlarında karıştırarak numunelerini hazırlamışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, Marshall stabilitesinin arttığını, akış değerinin azaldığını, Dinamik Sünme Testi sonucunda yüksek sıcaklıkta iyi performans gösterdiğini ve asfaltın strese karşı direncinde artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Akbari and Modarres (2017) kil ve kireç nano-katkı maddelerinin sıcak karışım asfaltın donma-çözülme dayanıklılığına etkisini inceledikleri çalışmalarında, 60/70 penetrasyon dereceli bitüme ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranlarında NC ve NL ekleyerek deney numuneleri hazırlamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonucunda, donma-çözünme döngülerinden sonra sıcak karışım asfaltın dayanıklılığını geliştireceğini göstermiştir. En optimum NC ve NL içeriğinin ise %3 ve %6 olduğunu tespit etmişlerdir.

Hamedi (2017) nano malzemeler kullanarak asfalt bağlayıcı modifikasyonunun sıcak karışım asfaltın nem hasarı üzerindeki etkisini incelediği çalışmasında, 20-40 nm nano boyutta Al₂O₃ ve Fe₂O₃ kullanarak 60/70 penetrasyonlu baz asfalt bağlayıcıya %2 ve %4 oranlarında eklenerek 120-150 °C’de 28.000 d/d karıştırma hızında 20-30 dakika boyunca karıştırılarak numuneler hazırlamıştır. Çalışmasının sonucunda, nano katkı

malzemelerinin asfalt karışımının mukavemetini arttırdığını, nem hasarı oluşma olasılığını azalttığını ve bu sayede sıyrılma enerjisi ihtiyacının arttığını ve sonuçta asfalt karışımının nem hasarına karşı mukavemetini arttırdığını göstermektedir.

Karahançer (2017) yaptığı çalışmada, mofiyе bitüm elde etmek için çoğul duvarlı karbon nanotüp, nano çinko oksit ve %50 oranında silika ile modifiye edilmiş karbon nanotüp kullanarak %1, %3 ve %5 oranında ilave ederek modifiye bitüm elde etmiştir. Ayrıca silika nano tozu kullanılarak PG 64-22 performans sınıfındaki saf bağlayıcıya %0,1, %0,3 ve %0,5 oranında bitüm modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Modifiye bitüm numunelerini ise yüksek devirli karıştırıcıda 160 °C sıcaklıkta, 4.000 d/d karıştırma hızında 2 saat boyunca homojen olarak karıştırarak hazır hale getirmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda tüm modifiyeli bitüm numunelerinin tekerlek izi dayanımı ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımda yüksek performans gösterdiklerini tespit etmiştir.

Öcal (2018) nano malzemelerin bitümlü sıcak karışımların Marshall ve Superpave karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırdığı çalışmasında, 50/70 penetrasyonlu saf bitüme %1, %3, %5 ve %8 oranlarındaki modifiye katkısı olarak Nano Magnezyum Spinel Oksit ve Kolemanit kullanmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucunda, iki katkı malzemesiyle yapmış olduğu modifiye bitüm uygulaması neticesinde, yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi ve orta sıcaklıklardaki yorulma dayanımında önemli ölçüde arttığını belirlemiş ve nano malzemelerin kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların performanslarını arttırabileceğini kanıtlamıştır.

Giuffrè et al. (2018) yapmış oldukları çalışmada, Rejenerasyon işlemi sonucunda elde edilen bazı metal oksitler ve SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) kullanarak hazırladığı modifiye bitüm numunelerini, 70/100 penetrasyonlu saf bitüme değişik oranlarda ilave ederek, 180 °C sıcaklıkta, 4.000 d/d karıştırma hızında 120 dakika boyunca karıştırdıktan sonra, karışımın stabilizasyonunu sağlamak amacıyla 24 saat boyunca 180 °C sıcaklıktaki fırında bekleterek deney numunelerini hazır hale getirmiştir. Metal oksitlerin içerisinde demiroksit (hematit), çinko, magnezyum, nikel ve çok az miktarda da diğer metallerden bulunmaktadır. Bunlar kullanılmış asit likitlerinin rejenerasyon işlemi sonucu yan ürün olarak ortaya çıkmış maddelerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda modifiye bağlayıcının yumuşama noktasının ve penetrasyonunun arttığı,

termal çatlama etkilerinin azaltıldığı ve plastik deformasyona karşı direncin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Optimum katkı oranının ise %5 SBS ile %30 hematit içeren bitüm karışımı olacağını belirlemişlerdir.

Zhang et al. (2018) farklı çok boyutlu nanomalzemelere sahip SBS modifiye asfalt bağlayıcıların reolojik ve yaşlanma karşıtı performansını inceledikleri çalışmada, 15-25 nm partikül boyutundaki yüzey modifikasyonuna sahip nano -silika , nano-titanyum ve nano-çinko oksiti kullanarak, Stiren – Butadien – Stiren Modifiye Asfalt (SBSMA) içerisine %2 oranında ilave edip, 175 ± 5 °C’de 4.000 d/d’de 60 dakika boyunca karıştırmak suretiyle numuneleri hazırlamışlardır. SBSMA içinde çok boyutlu nano malzemelerin ince bir şekilde dağılmasını sağlamak için, karışım ayrıca bir kürek karıştırıcı kullanılarak 90 dakika boyunca 175 °C’de 2.000 d/d’de karıştırılmıştır. Üç tip çok boyutlu nano malzeme, hem yırtılma hem de yaşlanma karşıtı performansları geliştirirken, SBSMA'nın yorgunluk performansını azaltmıştır. SiO₂'den oluşan nano kompozitler dışında, diğer iki çok boyutlu nano malzeme SBSMA'nın termal çatlama direncini artırmışlardır. İncelenen çok boyutlu nano malzemeler arasında, %1 SBS + %2 TiO₂ nin, hem reolojik hem de yaşlanma karşıtı değerlendirmeler göz önüne alındığında optimal olduğu tespit edilmiştir.

Saltan vd. (2018) Çinko Oksit Nanoparçacık ile modifiye edilmiş bitüm ve sıcak karışimli asfaltın mekanik davranışını inceledikleri çalışmalarında, çinko oksit nanoparçacığın (ZnONP) modifiye bitümün kalıcı deformasyonu üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Bitüm modifikasyonunu, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında yüksek kesmeli bir karıştırıcı kullanılarak 4.000 d/d hızında 160 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca karıştırılarak gerçekleştirmiş, asfalt karışımlarının tüm nano modifikasyonlar için neme karşı oldukça dirençli olduğunu tespit etmişlerdir. Modifiye işleminden sonra penetrasyon ve yumuşama noktasında artış meydana gelmiştir. En iyi performans %5 ZnONP modifikasyonu ile elde edilmiş, tüm değişikliklerden sonra performans derecesi PG 64-22 olarak belirlenmiştir.

Hussein et al. (2019) yaptıkları çalışmada, nano seramik tozunun bitüm modifikasyonu olarak fiziksel, kimyasal ve morfoloji karakterizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, bir nanoseramik toz (NCP) oluşturmak için mekanik bir bilyalı değirmende kuru öğütme yoluyla toz halinde 100 nm den daha küçük partikül

boyutundaki katkı maddesi kullanılmıştır. Nanoseramik-bitüm modifikasyonu için 60/70 penetrasyonlu saf bitüm kullanılarak ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında ilave edilmiş, sıcaklık, süre ve kesme karıştırıcı hızı sırasıyla 160 °C, 90 dakika ve 4.000 d/d olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonucunda modifiye bitümün penetrasyon oranı azalmış, yumuşama noktasında ve sürtünme direncinde artış meydana gelmiştir. Yumuşama noktasındaki bu artış, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona karşı muhtemelen daha fazla direnç olduğunu göstermektedir. Modifiye edilmiş bitüm, özellikle sıcak iklimlerde, kalıcı deformasyona karşı önemli direnci nedeniyle, kullanım için uygun olmuştur. Bu sonuçlar, seramik esaslı nano malzemelerin, düşük sıcaklıkta yorulma çatlağına karşı kırılabilirliği sınırlamak için bir modifiye edici için mükemmel bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Xu et al. (2019) nano çinko oksit tozu ile modifiye edilmiş asfaltın fiziksel özellikleri ve yaşlanma karşıtı özelliklerini incelediği çalışmada, 69,0 penetrasyonlu saf bitüme nano boyuttaki çinko oksit (ZnO) tozunu kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ekleyerek, yüksek hızlı karıştırıcı ile 150 ± 5 °C sıcaklıkta, 5.000 d/d hızda 60 dakika boyunca karıştırdıktan sonra, 90 dakika süreyle 2.000 d/d hızda karıştırarak deney numuneleri hazırlamışlardır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda, modifiye bitümün yumuşama noktası sıcaklığının ve sıcaklık hassasiyetinin arttığı, penetrasyon değerinin azaldığı görülmüştür. Nano-ZnO orijinal asfalt üzerinde güçlendirici etkiye sahiptir ve orijinal asfaltın düşük sıcaklık sünekliği iyileştirilmiştir. Orijinal bağlayıcının kütlesinde makul Nano-ZnO dozunun %3,0 olduğu belirlenmiştir. Nano-ZnO'nun asfaltın kayma direncini ve viskoelastik performansı artırdığı ve yorulma performansını iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca modifiye bitüm bir UV-Vis-kızılötesi spektrofotometre kullanılarak UV soğurma analizine tabi tutulmuş, modifiye edilmiş bağlayıcının ultraviyole ışık emme değerinin orijinal bağlayıcıdan önemli ölçüde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Nano ölçüdeki malzemelerin boyutları, çok geniş yüzey alanları sağlamakta, polimerler ile nanokompozit madde oluşturmaktadır. Polimerlerin dayanımlarında artış, iyi dağılım ve hidrofobiklik gibi kazandıkları çeşitli özellikleri araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Karbon siyahı, lastik parçacıkları, uçucu kül çeşitleri ve pigmentler daha önceki araştırmalara konu olan makro ve nano boyuttaki malzemelerin, bitümün

reolojik davranışları üzerinde pozitif etki oluşturmuşlardır (Ahmedzade ve Geçkil 2007; Tapkın 2008; Navarro et al. 2005).

Geçmişte yapılmış olan bitümün modifiye edilmesiyle ilgili çalışmalarda, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden elde edilen türev ürünler, ya bitümlü bağlayıcıların içerisine katılarak veya sıcak karışımlara eklenerek kullanılmıştır. Pek çok nano materyal de bitümün modifiyesinde kullanılmışsa da, bu çalışmada ÖTL'den piroliz yöntemiyle elde edilen ağır lastik yağı ve nonokromoksit bitümlü bağlayıcının modifiye edilmesinde ilk defa birlikte kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışma kapsamında, Ömrünün Tamamlamış Lastiklerden Piroliz (Yüksek Isıda Geri Kazanım) yöntemi ile elde edilen ağır fraksiyon lastik yağı (ALY) ve Nano Kromoksit (NKO) tozu, saf bağlayıcının modifiye edilmesinde kullanılıp, modifiye bağlayıcının reolojik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. ÖTL'den piroliz yöntemiyle elde edilen ALY, Erzincan OSB'de faaliyet gösteren ERA Çevre Teknolojileri Anonim Şirketinden, NKO ise Nanokar Kimya Maden Sanayi Ticaret Limited Şirketinden elde edilmiştir.

3.1.1 Bitümlü bağlayıcılar

Bitümlü karışımların üretilmesi, ilgili teknik şartnamede belirlenen orandaki bitümlü bağlayıcı ve standart agreganın karıştırılması ile gerçekleşir. Bitümlü karışımların bir arada durabilmesi bitümlü malzeme ile içsel sürtünme direnci ve stabilitesi ise agrega ile sağlanır. Agregada danelerinin bir arada durmasına yarayan bitümlü bağlayıcı, etki eden trafik yükü karşısında dağılmayı önlemektedir. Ayrıca karışım içindeki boşlukları doldurup geçirimsizlik oluşturmada ve düzgün yüzey oluşturarak da sürüşlerin daha konforlu olmasını sağlamaktadır. Karışımın ağırlık oranı olarak maksimum %5 ile %7, hacimsel olarak da %13 ile %15 oranında yer tutan bitümlü bağlayıcılar, bitümlü karışımların stabilitesini de arttırmaktadır (Tunç 2001).

3.1.1.1 Asfalt

Asfalt, rengi siyah ile koyu kahverengi arasında değişkenlik gösteren, katı ve yarı katı özellikte, ısıtıldığında ya da çözücüler kullanıldığında sıvılaşan, kullanımı çok eskiye dayanan mühendislik materyallerinden biridir. Doğal halde bulunmasının yanı sıra ham petrolü damıtarak da elde edilebilmektedir. Doğal ve Rafineri (Yapay) olmak üzere farklı gruplarda sınıflandırılmaktadır.

3.1.1.1.1 Doğal asfalt

Doğada minerallerle karışım halinde bulunan doğal asfalt, petrolün yer altından yüzeye çıkararak zaman içerisinde bünyesinde barındırdığı uçucuların kaybolması yani distile olmasıyla meydana gelir. Kaya asfaltı ve Göl asfaltı diye sınıflandırılabilirler. Ülkemizde ise Mardin, Hatay, Eskişehir ve Bolu civarlarında bulunmaktadır. (Çelik 2006).

Kaya asfaltı, kumtaşı ve kalkerin gözeneklerine asfaltı emmesi sonucu oluşmuştur. %90'a yakın oranda mineral bileşenden, %10 ise bitümden meydana gelmiştir. Ülkemizde bulunan kaya asfaltı kumtaşı, kil ve kalker gibi maddelerle %2 ila %12 arasında değişen oranlarında karışım halinde mevcuttur (Çelik 2006).

Göl asfaltı ise, esas olarak bitümden oluşmaktadır. En bilindik Göl Asfaltlarından olan Trinidad Göl asfaltı, bileşiminde %54 oranında bağlayıcı, %36 oranında mineraller ve %10 oranında da organik maddeler bulunmaktadır. Sert yapılı olması nedeniyle yumuşatıcılarla birlikte yol inşaatlarında kullanılmaktadır.

3.1.1.1.2 Rafineri (Yapay) asfaltı

Rafinerilerde yapay olarak elde edilen asfalt, petrolün distilasyon işlemi gördükten sonra, katbek ve emülsiyon olarak 2 farklı şekilde oluşur. Şekil 3.1'de görülen, ileri seviye damıtmadan sonra yavaş kür olan yağlar elde edildikten sonra ise geriye Asfalt Çimentosu kalır (AÇ).

AÇ, istenen penetrasyona göre ayarlanarak üretilebilir. Bitümlü kaplamalar için özel üretilen ve petrol kökenli olan bu malzeme genellikle yol üstyapılarında kullanılmaktadır. AÇ, kolay işlenebilirlik ve akıcı olması için ısıtılması gerekmektedir. Soğuduğu anda sertleşip bağlayıcı özelliğini kazanır. 10 ile 300 arasında gösterilen penetrasyon derecesine göre sınıflandırılmaktadır. Penetrasyonu yüksek olan asfalt çimentosu daha yumuşak ve daha az bağlayıcı özellikte demektir. En yumuşak olan asfalt çimentosu AC 200-300, en sert olan ise AC 20-30 dur. Katbek ve emülsiyonların da başlıca ve en önemli maddesi asfalt çimentosudur (İsfalt A.Ş 2002).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Asfalt emülsiyonları, emülgatör cinsine göre ve bitüm daneleri çevresindeki elektrik yüklerinin hareketine göre Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi 3 sınıfa ayrılırlar:

Çizelge 3.1 Elektrik yüklerinin hareketine göre emülsiyon sınıfları (Bitüm el kitabı 2002).

Katyonik	Pozitif elektrik yüklü danecikler katoda taşınırsa
Anyonik	Negatif elektrik yüklü danecikler anoda taşınırsa
İyonik olmayanlar	Her iki kutba taşınmayan nötr danecikler

Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği (AASHTO) ve Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) tarafından bahsedilen emülsiyonlar için şartnameler oluşturulmuştur. Anyonik ve katyonik olmak üzere 2 sınıfa ayrılan bu emülsiyonlar, viskozitesini gösteren rakam ve harflerle sınıflandırılmaktadır. Başında “C” harfi bulunan emülsiyonlar katyonik tip emülsiyonlardır. Tanımında “h” harfi bulunan asfalt çimentosu sert, “s” harfi bulunan ise daha yumuşak olduğunu ifade etmek için kullanılır. AASHTO ve ASTM ye göre emülsiyon sınıfları Çizelge 3.2’deki gibidir:

Çizelge 3.2 Emülsiyon sınıfları.

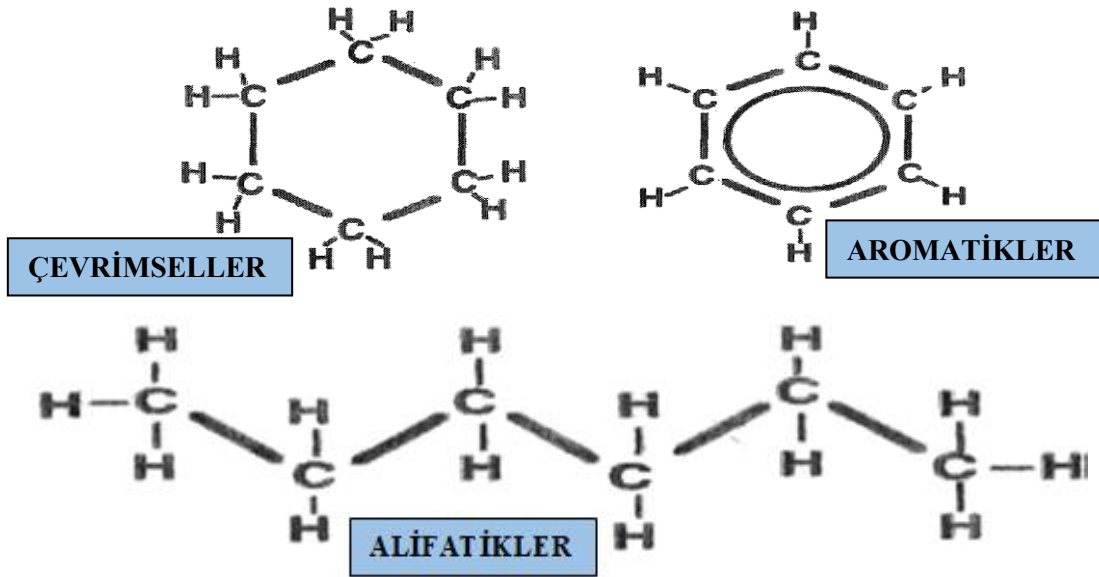
Katyonik Emülsiyonlar (AASHTO M208, ASTM D2397)	Anyonik Emülsiyonlar (AASHTO M140, ASTM D977)
CRS-1	RS-1
CRS-2	RS-2
-	HRS-2
-	MS-1
CMS-2	MS-2
CMS-2h	MS-2h
-	HFMS-1
-	HFMS-2
-	HFMS-2h
-	HFMS-2s
CSS-1	SS-1
CSS-1h	SS-1h

3.1.1.1.3 Asfaltın kimyasal yapısı

Asfalt, ağırlıkça %90 ila %95 oranında hidrojen ve karbondan oluşan, farklı basınç ve sıcaklıklar altında milyonlarca yılda oluşan ham petrolün bir yan ürünüdür. %5 ile %10 oranında da metaller, oksijen, nitrojen ve sülfürden oluşur. Oksijen, kükürt ve azot asfaltın moleküler yapısında karbonun yerini alarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişme neden olurlar. Bu maddelerin miktar ve cinslerine bağlı olarak asfaltın ve hammaddenin yaşlanması etkilemektedir. Asfaltın yaşlanmasında ana süreç

oksidasyondur. Yani oksijen ile birleşmedir. Kükürt özellikle karbon ve hidrojenen daha hızlı oksidasyona uğramaktadır. Degradasyon (ışık etkisinde ayrışma) ve buharlaşma da diğer etkenlerdendir.

Asfalt içeriğindeki metaller, ham maddenin çeşitlendirilmesindeki en önemli etkidir. Molekül yapısı oldukça karışık olan asfaltın kimyasal bağ ve boyut özellikleri kaynağına göre değişiklikler göstermektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere çevrimseller, aromatikler ve alifatikler olmak üzere üç farklı moleküler yapı bulunmaktadır. Aromatikler keskin kokulu, kolayca bağ oluşturan, yassı ve kararlı karbon halkalarından oluşur. Doğada cilalı ve yağlı olarak bulunan alifatikler ya da parafinikler 3 boyutlu, lineer ve zincir yapılarıdır. Çevrimseller (naftenikler) ise farklı atomların bağ oluşturduğu 3 boyutlu ve doymuş karbon halkalarından oluşur. Tüm bu moleküller birbirlerini farklı şekillerde etkileyerek, asfaltın fiziksel ve kimyasal davranışlarını da değiştirirler.



Şekil 3.2 Asfalt molekül çeşitleri (Altaş 2002).

Asfalt moleküllerini bir arada tutmaya yarayan kimyasal bağların kuvvetli olmaması nedeniyle kesme kuvveti ve sıcaklığın etkisiyle kolayca kopabilirler. Bu da asfaltın termoplastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Asfalt ısıtıldığında bu bağlar koparak asfaltın akmasını sağlar, ancak tekrar soğuduğunda ise bağlar ve kimyasal yapı farklılaşarak eski halini almasına imkân tanımazlar.

Bu nedenlerden ötürü asfaltın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan ölçümler, sınıflandırma ve seçimde en önemli etkenlerdir.

3.1.1.1.4 Asfaltın sıcaklık etkisi altındaki davranışı

Asfalt içsel özellikleri nedeniyle yük ve sıcaklık altında değişik davranışlar göstermektedir. Düşük sıcaklıkta ve uzun sürede göstereceği akma davranışı ile kısa sürede yüksek sıcaklığın etkisiyle göstereceği akma davranış birbirine eşdeğerde olmaktadır.

Asfalt çimentosu, sıcaklığın düşük olduğu iklime sahip bölgelerde ya da seyir hızı yüksek ağır vasıtaların neden olabileceği kısa zamanlı yük etkisi altında katı elastik bir davranış sergiler. Yani yük etkisi altında oluşan şekil değişikliği, bu etki geçtiği vakit eski haline geri dönme özelliği gösterir. Taşıyabileceği maksimum yükten daha fazla yükleme yapıldığında ise kopmaya ve kırılmaya neden olmaktadır. Düşük sıcaklığın iç gerilmeleri artırma etkisiyle yüzeyin büzülme davranışı gösterdiği zamanlarda termal (düşük sıcaklık) çatlaklar görülmektedir (Tunç 2007).

Sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde, asfalt çimentosu, düşük hızda hareket eden ya da duran trafiğin neden olduğu sürekli yük etkisi altında viskozitesi düşük sıvı gibi davranış gösterir. Eski hallerine dönemedikleri için de plastik diye nitelendirilebilirler. Bu tür asfaltlarda stabilite özelliği düşük olduğundan kalıcı tekerlek izi oluşumu daha fazladır.

Orta sıcaklıklarda yani ne çok soğuk ne de çok sıcak iklim koşullarında ise asfalt çimentosu hem elastik hem de plastik davranış gösterebilmektedir. Yani viskoelastik bir davranışa sahiptir. Bu özelliği sayesinde yol kaplamalarında eşsiz bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyon ve izler kalıcı olmamakla beraber kısa süre sonra kaybolmakta ve kaplama eski haline geri dönebilmektedir.

Asfalt çimentosu, organik molekül yapısı nedeniyle oksijen reaksiyonu gerçekleştirir. Bu reaksiyon sonucunda molekül yapısı değişir. Bu olaya oksidasyon denir. Oksidasyona uğrayan asfalt çimentosu, yaşlanmaya başlamış yani sertliği ve

kırılganlığı daha da artmış olur. Isı etkisi altında hızlanan bir olay olsa da, uzun sürede gerçekleşen oksidasyon sertliği nedeniyle, önceden inşa edilen yol üst yapılarının çatlama hassasiyeti daha yüksektir. Gerekli düzeyde ve yeterlilikte sıkıştırılmayan karışımların içerisinde artan hava boşluğu sebebiyle, daha fazla oksidasyon gerçekleşir ve bunun sonucunda da yoğun oksidasyondan kaynaklanan sertleşme daha erkenden görülür.

Asfalt çimentosunun karışım ve serilme esnasında yapısında bulunan uçucuların buharlaşması nedeniyle oluşan sertleşmeye de buharlaşma sertleşmesi denir. Düşük sıcaklığa maruz kalarak büzülmeye başlayan asfalt çimentosunda ise fiziksel sertleşme meydana gelir (Tunç 2007).

3.1.1.2 Bitüm

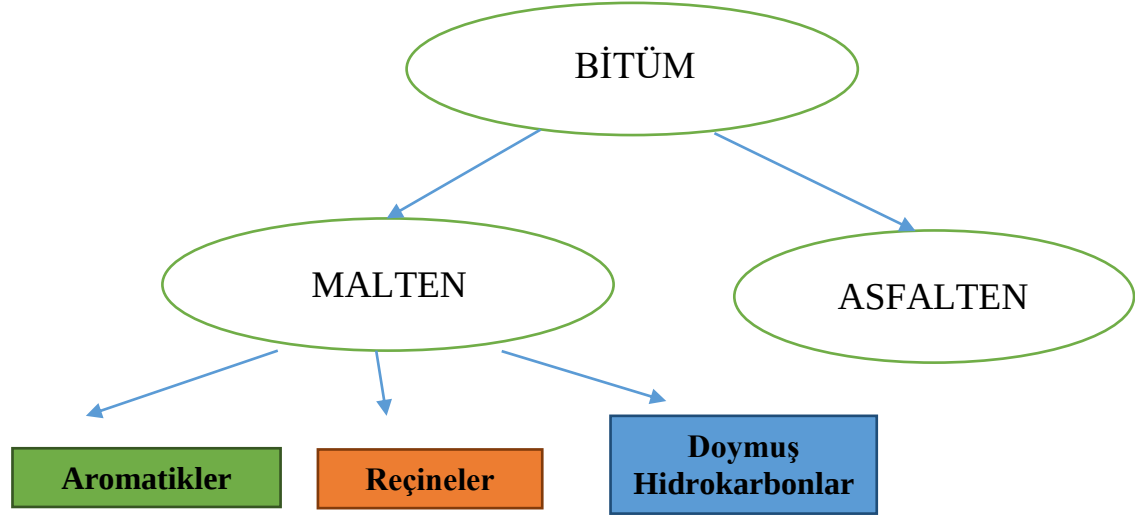
Rengi siyaha ve kahverengiye çok yakın olan (Şekil 3.3), suyu geçirmeyen ve bağlayıcı özellikte, içeriğinde hidrokarbonların ve türevlerinin bulunduğu, trikloretilenle karıştığında çözünen, uçuculuk özelliği olmayan bitüm, ısı etkisiyle yumuşayabilen ve akışkan hale gelen, yarı-katı ya da sıvı formda bulunmaktadır (BS 3690 1989).



Şekil 3.3 Bitüm.

Bitüm, asfalten ve malten olmak üzere iki ayrı kimyasal gruptan oluşur (Şekil 3.4). Bitümün %5-%25'i asfaltenlerden oluşur ve miktarına bağlı olarak bitümün reolojik özelliklerini önemli derecede etkiler. Yüksek oranda asfalten içeren bitümün penetrasyonu yüksek, yumuşama noktası ise düşük olur. Yani daha sert ve viskozitesi yüksektir. Maltenler ise doymuş hidrokarbon, aromatik ve reçinelerden oluşan üç farklı

gruba ayrılmıştır. Bitümün kullanılabilir hale gelmesi, ısıtılarak sıvılaştırmayla mümkündür. Agrega ile karıştıktan sonra onları sararak soğur ve tekrar sertleşip, bağlayıcılık görevini üstlenir (Çelik 2006).



Şekil 3.4 Bitümü oluşturan kimyasallar.

Bitümün reolojik özelliğine bağlı çeşitliliği, ham petrol farklılığından ve işlenme metotlarından kaynaklanmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesini agregalar, kohezyonunu ise bitüm sağlamaktadır. Performansını etkileyen birçok faktörden en önemlileri ise, içeriğindeki bileşenlerin kalitesi ve karışım tasarımıdır. Dünyada kullanılan bitümün yaklaşık olarak %85'i yolların inşasında, %10'luk kısmı çatıların yalıtımında, %5'i ise diğer geçirimsizlik istenilen yerlerde tüketilmektedir (Hunter et al. 2015; Speight 2015).

Asfaltenlerin içeriğinde, nitrojen, karbon, oksijen, hidrojen ve sülfür bulunur. Amorf katı olarak nitelendirilen asfaltenler n-heptanda çözülmez, siyaha ve kahverengine yakın renktedirler. Molekül ağırlığı yüksek, elektrik yüküne sahip, kompleks aromatiklerdir.

Aromatiklerin moleküler ağırlığı ise bitüm içerisindeki en düşük olanıdır. Asfaltenlerin bitüm içerisinde dağılıp yayılmalarını sağlayan önemli bileşendir. Koyu kahverengiye yakın renkte, viskoz özellikte ve ağırlıkça bitümün %40 ile %65'ini oluşturmaktadır.

Doymuş hidrokarbonların rengi beyaza ve açık sarıya yakındır. Elektriksel yükü bulunmayan viskoz özellikteki bu yağların bitüm içerisindeki oranı ise %5-%20 arasındadır.

Asfaltın ayrı ayrı yayılmasını sağlayan reçineler, içerikteki asfaltın oranına göre bitümün jelatin ya da çözelti özelliğinde olmasını kontrol eder.

3.1.1.2.1 Bitüm reolojisi

Reoloji, Yunan dilinde akış anlamına gelen “rheia” kelimesinin türetilmesiyle oluşan, bir malzemenin yüklerin etkisi altındaki davranışını inceleyen bilim dalıdır (Mezger 2006). İncelenen malzemenin deformasyonundaki değişim, sadece yüklerin değil, yükleme süresinin de dikkate alınarak hesaplanmasını gerektirir. Deformasyon ve gerilmeyle ilişkili olarak üç farklı sınıfta incelenen materyaller, viskoz, elastik ve viskoelastik olarak sınıflandırılmaktadır (Tunç 2007). Bitümün reolojik değişikliklerini kavrayabilmek amacıyla, bitüm yapısı ve bileşiminin reolojisini değiştirecek nasıl bir etkileşimde olduğunun da bilinmesi gerekmektedir (Read and Whiteoak 2003). Reolojinin temelini oluşturan 2 ana unsur akma ve deformasyondur. Etki eden yükün karşılığı olarak şekilde ve ebatlarda oluşan değişiklik katılarda görülen deformasyon davranışlarıdır. Sıvı ve gazlarda, yükün etki ettiği süre boyunca devam eden deformasyona ise akma denir. Deformasyona uğrayan malzemeler, etkiyen yükün sıfırlandığı anda ilk haline dönemiyor ise, plastik davranış sergilediği söylenebilir (Hunter et al. 2015).

Bitümlerin tamamı termoplastik özelliktedir. Sıcaklığın azalmasıyla sertleşerek viskozitesi artar, sıcaklığın artmasıyla da yumuşayarak viskozitesi azalır. Bitümün bu en önemli özelliğine verilen isim sıcaklık duyarlılığıdır. Bu özelliği sayesinde, doğal şartlar altında karışımdaki agregaları bir arada tutacak ölçüde yeterli viskoziteye sahip, yüksek ısılarda karışımın içerisindeki agregaları kaplamaya yetecek seviyede de akışkanlık özelliğine sahiptir (Speight 2015).

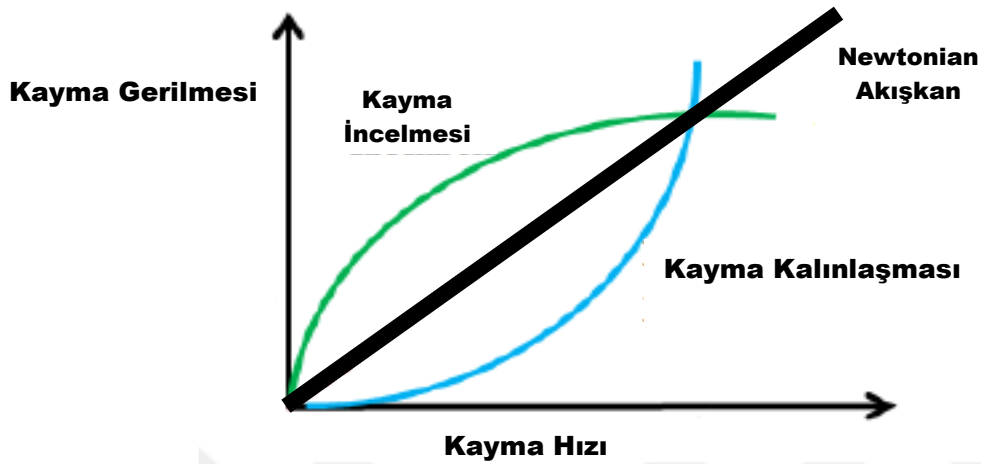
Viskozitesi yüksek olan malzemelerin, gerilmeye bağlı deformasyonu uygulandığı an başlayıp, gerilmenin uygulandığı süre boyunca da artarak devam eder. Deformasyonun miktarı gerilmenin büyüklüğüyle paralellik gösterir. Elastik özelliğin

aksine, yük etkisi kaldırıldığında bile bu deformasyon geçici olmayıp, kalıcı hale gelir (Tunç 2007).

Viskoelastik maddelerin davranışı ise tamamen elastik veya viskoz denilemeyecek özelliktedir. Üzerine uygulanan yükün etki hızına bağlı olarak yavaşça yapılan yüklemelerde viskoz, hızlıca yapılan yüklemelerde ise elastik özellikte davranırlar.

Bitümün gösterdiği bu davranış şekillerine bağlı olarak, sıcaklık-zaman süperpozisyonu denilen, yüksek sıcaklık ve kısa süreli yüklemelerde meydana gelen akmanın, düşük sıcaklıktaki uzun süreli yüklemelerde meydana gelen akmaya eşit miktarda olduğu belirlenmiştir (Asphalt Institute 2007).

Bitümün içeriğinde çok çeşitli bileşenler bulunmasına karşın, sıcaklığın fazla olduğu hallerde Newtonian akışkan gibi davranır (Şekil 3.5). İçeriğinde asfaltinin ya da kristalize bileşenlerin oransal olarak çokluğu nedeniyle bu özelliği gösterdiği durumlar bazen azalmaktadır. Ayrıca Polimer Modifiye Bitümler (PMB) gibi anlaşılması zor yapılı bağlayıcılarda, daha kompleks viskoz deformasyonu ve elastik özellikler görülmektedir (González 2010).



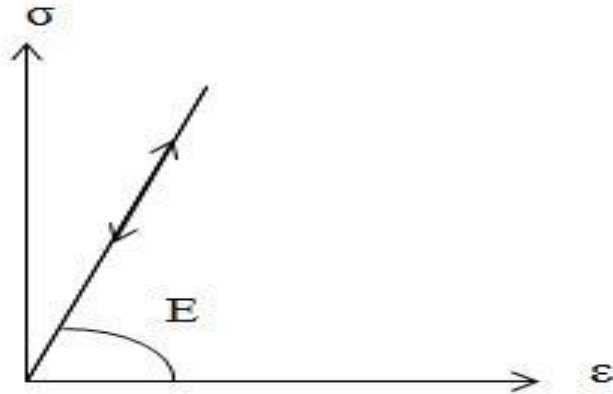
Şekil 3.5 Kayma hızına bağlı akışkan davranışı (Barnes et al. 1998).

Bitümlerin reolojik özellikleri sıcaklık/zaman/gerilme/şekil değiştirme etkilerine karşı gösterdiği tepkiyle tanımlanabilir. Gerilme etkilerine karşı gösterdiği tepki ise sıcaklıkla ve yüklemenin süresiyle bağıntılıdır. Sıcaklığın düşük ve yükleme süresinin az olduğu zamanlarda tıpkı cam gibi elastik katılara benzer özellik gösterir. Fakat

yüksek sıcaklıkta yavaşça yapılan yükleme altında ise viskozitesi yüksek sıvı gibi hem termoplastik hem de viskoelastik davranış sergiler (Hunter et al. 2015).

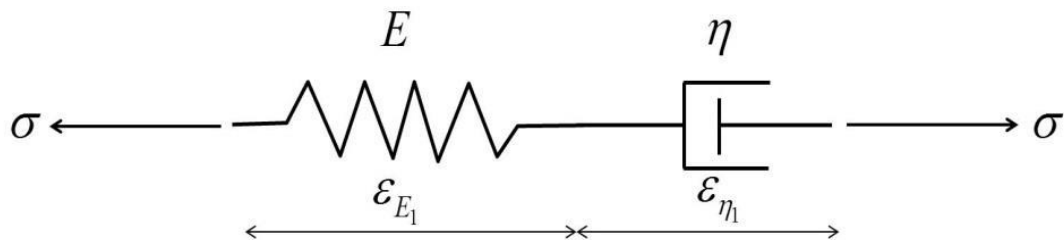
Bitümün elastik katılar gibi davrandığı ortam, düşük sıcaklıktaki ortamlardır. Elastik katılar, yükleme etkisiyle az da olsa deformasyona uğrar, daha sonra bu etki ortadan kalktığında deformasyona uğrayan bölgeler eski haline dönerler. Fakat bu yükleme miktarı, bitümlü malzemelerin dayanım sınırını aştığında ani kırılmalara ve çatlamalara neden olur (Francken 1998; Partl et al. 2012).

Şekil 3.6’da tam elastik bir maddenin, yük etkisindeki, şekil değiştirme davranışının nasıl olduğu gösterilmektedir. Buradan görüleceği üzere, yükün kaldırılmasıyla birlikte, etkiyen yüklerle oluşan gerilmenin ve şekil değiştirmenin de tamamen eski haline döneceği yani sıfırlanacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.6 Elastik katıların gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

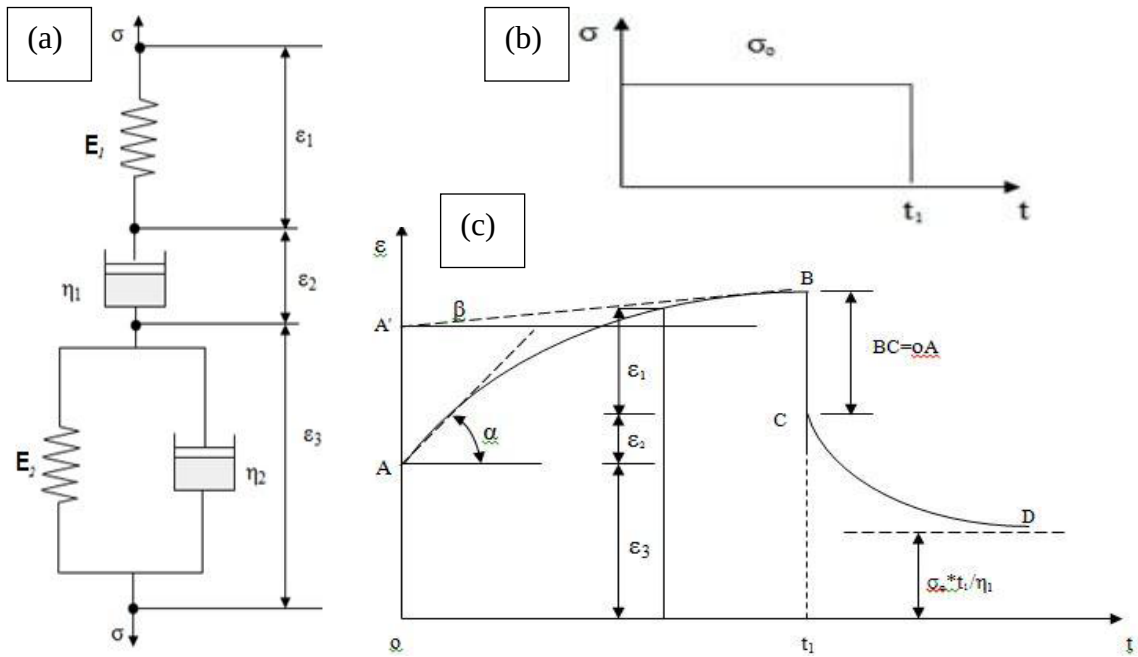
Bitüm, sıcaklığın çok düşük ya da çok yüksek olmadığı sıcaklıklarda yarı katı haldeyken viskoz ve elastik deformasyon özelliğini aynı anda göstererek özgün bir davranış sergiler. Viskoelastik maddelerin yük etkisi altında gösterdiği davranışın açıklanabilmesi amacıyla geliştirilmiş olan yağ kutusu ve yaydan oluşan şekil, Maxwell modeli (Şekil 3.7) olarak adlandırılmaktadır (Mezger 2006).



Şekil 3.7 Maxwell modeli (Mezger 2006).

Maxwell modelindeki yay, sonsuz elastik yapı (E) şeklinde malzemeye ilk kuvvetin etki ettiği anda meydana gelen anlık ve elastik deformasyonu temsil etmektedir (ε_{E1}). Daha sonra ise, yüklemenin sürdüğü esnada oluşacak deformasyon, sonsuz viskoz olarak temsil eden yağ kutusuna iletilir (η). Yükleme sonlandırıldığında ise yay en baştaki şekline dönüşür, yağ kutusu ise hareketsiz kalır, fakat yağ kutusundaki yer değiştirme eski halini geri kazanamaz ($\varepsilon_{\eta 1}$) (Mezger 2006).

Bitüm, yükleme esnasında anlık bir deformasyona uğrar ve yükleme işlemi sürdükçe oluşan bu deformasyon da artarak devam eder. Yükleme işlemi sonlandırıldığında anlık deformasyon eski haline döner ve zamana bağlı olarak “gecikmiş elastisite” denilen ufak bir deformasyon daha geri kazanılır. Fakat viskozite özelliğine bağlı olarak oluşan deformasyon ise kalıcıdır. Yani yüklemenin süresine bağlı olan deformasyon, değişken trafik hızlarında değişken miktarlarda meydana gelmektedir (Geçkil 2008). Bu olayın modellenmesini yukarıda bahsedilen Maxwell modellemesi tam olarak karşılamamaktadır. Şekil 3.7’de gösterilen Maxwell modellemesinin geliştirilmiş hali olan dört elemanlı modelin kullanılması daha açıklayıcı olmaktadır. Şekil 3.8 (a) ile gösterilen, E_1 yayı anlık elastik deformasyonun, E_2 yayı ile η_2 yağ kabı zamansal deformasyonun, η_1 yağ kutusu ise sürekli deformasyonun temsil edildiği materyallerdir. Şekil 3.8 (b,c)’de, yüklemenin sonlandırılmasıyla anlık ve gecikmeli deformasyonun tekrar kazanıldığı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Dört elemanlı Burger modeli (Abd El-Maksoud et al. 2009).

Bu modellemelerden de anlaşılacağı üzere, viskoelastik bir malzemenin kalıcı deformasyonunu etkileyen en önemli unsur yüklemenin süresidir. Bitümlü kaplamalar durağan ve yavaş trafikte viskoz davranış sergilerken, akan ve hızlı trafikte ise elastik deformasyonun görüldüğü özgül bir davranış sergilemektedir. Trafiğin ne yavaş ne de hızlı olduğu zamanlarda ise viskoelastik özelliktedir.

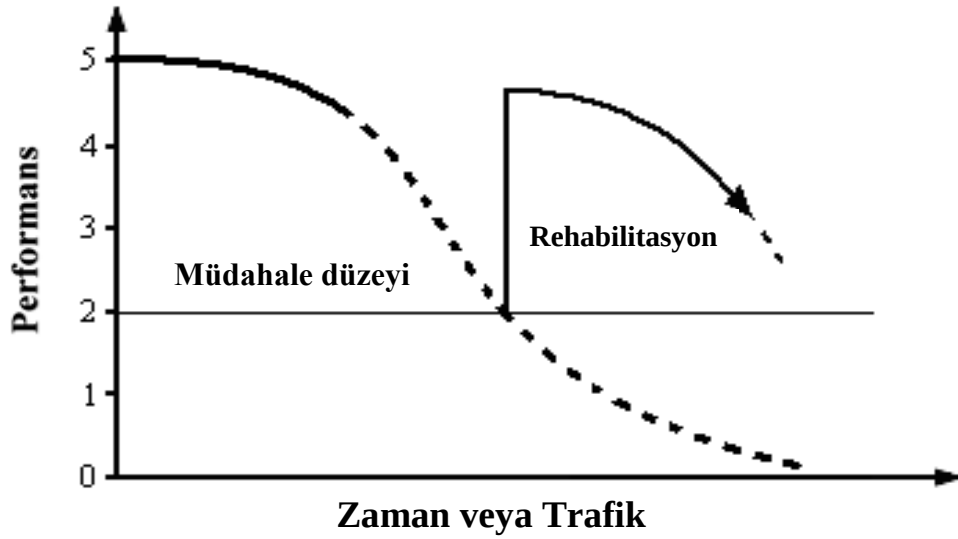
3.1.1.2.2 Bitümlü kaplamalarda meydana gelen bozulma ve deformasyonlar

Bitümlü kaplamalarda oluşan deformasyonları üç temel başlık altında toplayabiliriz. Bunlar, sürekli deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamlardır (Tunç 2001). Bitümlü kaplamalar yapım aşamasında ne kadar iyi tasarlanıp projesine uygun yapılmış olsalar da, zamanla oluşan bu bozulma ve deformasyonların temel nedenleri, başta trafik yükünün olumsuz etkileri olmak üzere, hava-iklim şartları, yüzey sularının drene edilememesi, seçilen malzemelerin standartlara ve kullanım koşullarına uygun olmaması, yol altyapısındaki temel tabakalarının taşıma güçlerinin gerekenden daha düşük seviyede olması, tasarım ve imalat kusurları, kalitesiz ve uygun olmayan malzeme seçimi, periyodik bakım hataları ve denetimsizlik gibi faktörlerdir.

Bitümlü kaplamalarda görülen bu deformasyon ve bozulmalardan birinin ya da birkaçının birlikte meydana gelmesi, kaplamanın performansını ve kullanım ömrünün oldukça azaltmaktadır. Kaplama içeriğinde bulunan bitümün yaşlanması bazen olumlu, ancak genelde olumsuz durumlar ortaya çıkarır. Kaplamanın performansının yeterli olduğu hallerde aşırı sertleşmenin ve rijitliğin görüldüğü durumlarda yaşlanmanın zararlı olduğu; daha esnek bir karışımın sertleşip performansı yeterli seviyeye ulaştırdığı zaman ise yaşlanmanın faydalı olduğu söylenebilir (Speight 2015).

Yük etkisi altında kalan bitümlü kaplamalarda iki tür gerilme oluşur. Birincisi dikey ekseninde oluşan ve sıkışmaya neden olan gerilme, ikincisi ise kaplamanın alt kısmında oluşan ve ayrılmaya neden olan çekme gerilmeleridir. Bitümlü kaplamaların bu gerilmelere karşı koyabilecek özellikte olması gerekmektedir. Hem sıkışmaya karşı koyabilecek düzeyde mukavemetli, hem de çatlamaya neden olabilecek çekme gerilmelerine karşı esnek olmalıdır.

İklim ve trafik şartlarına bağlı olarak zaman içinde bozulan ve deforme olan kaplamalar belirli zamanlarda yani periyodik olarak bakım ve onarıma gerek duymaktadırlar. Yapılmadığında ise kullanım ömrü çok daha kısa olacak ve kullanılamaz hale gelecektir. Şekil 3.9’da, Performans diye adlandırılan ve 0’dan 5’e kadar değişkenlik gösteren, kaplamanın yüksek hacimli ve hızlı trafiğe hizmet edebilecek kapasitede olduğunu ifade eden değere servis yeteneği indeksi denilmektedir. Bu değerın sıfır olduğu durumda yol kaplaması hizmet edemeyecek duruma gelmiş demektir. Kaplamanın ekonomik ömrünü uzatmak ve performansını artırmak için ise periyodik bakımların zamanında ve uygun şekilde yapılması gerekmektedir (Çakıroğlu 1996).



Şekil 3.9 Üstyapı performans eğrisi (Çakıroğlu 1996).

3.1.1.2.2.1 Kalıcı deformasyonlar

Yol yapısında sıklıkla karşılaşılan bozulmaların başında kalıcı deformasyonlar gelmektedir. Oluşan bu kalıcı yapısal değişiklik, yol üst kotuna göre, boyuna çukurlaşmalar ve kabarmalar şeklinde görülmektedir. Stabilite yetersizliği nedeniyle oluşan bu tür bozulmaların başında tekerlek izi oluşumu gelir. Sıcak iklim koşullarında ve trafik yükünün ağır olduğu durumlarda daha çok meydana gelen tekerlek izi, alt tabakanın ve üst tabakanın zayıf olmasına, kış koşullarında kullanılan lastikler ve zamanla oluşan aşınmaya bağlı olarak, yetersiz sıkıştırma nedeniyle de konsolidasyondan (oturma) kaynaklanan 4 farklı şekilde gerçekleşmektedir.

Şekil 3.10'da görülen yapısal tekerlek izi, bitümlü kaplama tabakasının altında bulunan katmanların birinin ya da birkaçının deforme olması sonrasında oluşmaktadır. Buna sebebi ise, uygulanan yükü ortaya çıkan gerilmelere karşı koyamayan malzeme dayanımıdır. Bu deformasyon sonucunda tekerlek izinin yanlarında kabarma görülmez.



Şekil 3.10 Yapısal tekerlek izi oluşumu.

Oluşan bu tekerlek izinin nedenleri ise gerçek trafik şartlarına karşılık verecek şekilde tasarlanmamış olması, kalitesi düşük malzemelerin inşa sırasında kullanılması, yetersiz sıkıştırma oranı, drenaj eksikliği ve iklim şartlarına göre önlemler alınmamasıdır (Verstraeten 1995).

Şekil 3.11'de görülen akma tekerlek izi ise bitümlü kaplama tabakalarının kendisinde oluşan deformasyon sonucu meydana gelir. Nedeni ise yüke bağlı oluşan gerilmelere karşı, bitümlü kaplama tabakalarının malzeme dayanımının yetersiz kalmasıdır. Bu deformasyon sonrasında tekerlek izlerinin yan taraflarında kabarma meydana gelir.

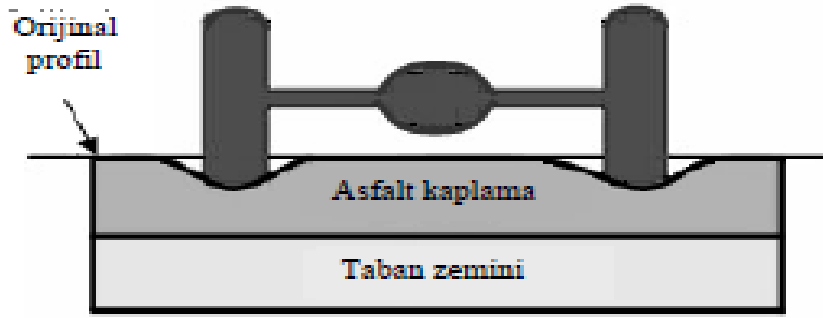


Şekil 3.11 Akma tekerlek izi oluşumu.

Bu şekilde meydana gelen deformasyonun nedenleri ise ağır taşıtların tırmanma esnasında hızlarını düşürerek daha uzun süre yol kaplamasını yüke maruz bırakmaları, kavşakların yaklaşma bölümlerinde ve kurbalarda, araç lastikleriyle kaplamaya temas eden kısımlarda meydana gelen teğetsel gerilmenin arttığı durumlardır. Bu tür tekerlek

izinın meydana gelmesine neden olan etkin faktör karışım oranı ve karışım içeriğindeki bileşen özellikleridir (Verstraeten 1995).

Şekil 3.12’de görülen aşınma ve konsolidasyon (oturma) tekerlek izleri yüzeysel olup şekilsel görünüşleri de birbirine benzemektedir. Aşınma tekerlek izi genellikle kışın ağır geçtiği bölgelerde ve kış koşullarına uygun yol kaplamasını daha fazla aşındıran araç lastiklerinin kullanıldığı zamanlarda daha çok görülür. Kaplama yüzeyine yakın olan agregalardaki aşınma sonucu meydana gelir. Bu nedenle kışın uzun ve daha ağır geçtiği kuzeyde yer alan ülkelerin yol kaplamalarında kullandıkları agrega gradasyonları diğer ülkelere göre daha iri danelidir. Finlandiya ve İsveç gibi ülkelerde kullanılan agrega türleri TMA-16 ve TMA-20 olarak değişkenlik göstermektedir (Bowskill et al. 1999).



Şekil 3.12 Aşınma ve konsolidasyon tekerlek izi oluşumu.

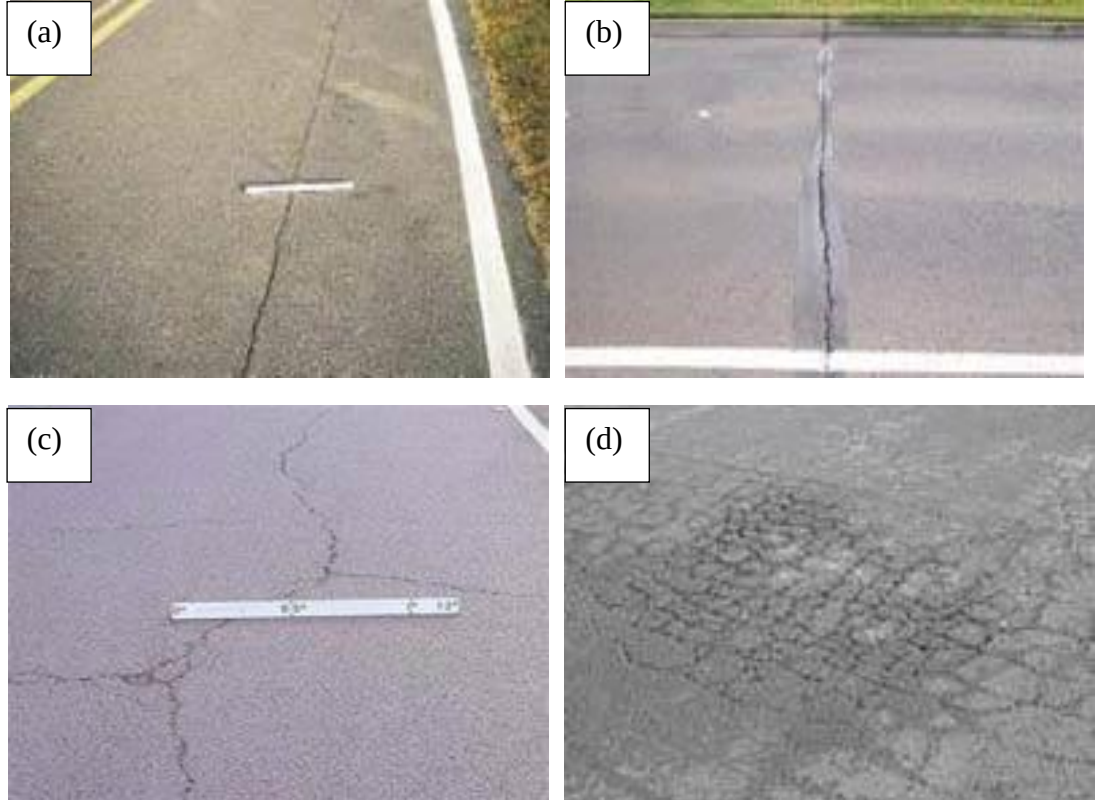
Konsolidasyon nedeniyle oluşan tekerlek izi de yüzeysel olup bitümlü kaplamanın yapım aşamasında yetersiz sıkıştırılmasından kaynaklanmaktadır. Sıkıştırma oranı düşük olan bitümlü kaplamalar, genellikle sıcak iklim koşullarının hakim olduğu bölgelerde ve trafik hızının düşük olduğu kavşaklarda konsolidasyon tekerlek izinin oluşmasına sebep olur. Oluşan bu tekerlek izinde kenar bölgelerde kabarmalar görülmez (Verstraeten 1995).

3.1.1.2.2 Termal ve yorulma çatlakları

Bitümlü kaplamaların performansını olumsuz etkileyen ve sıklıkla oluşan bozulmalardan biri de termal ve yorulmadan kaynaklı çatlaklardır. Şekil 3.13’te kaplamaların yüzeyinde oluşan bu kusurlar değişik derinlik ve genişliklerde iklim ve trafik etkilerine bağlı olarak görülmektedir. Oluşan bu çatlaklar, stabilite çatlakları,

yansıma ve yorulma çatlakları olarak sınıflandırılmaktadır. Yorulma çatlakları ilk başta bloklar halinde meydana gelirken, ilerleyen zamanlarda timsah sırtına benzeyen şekillerde görülmektedir. Termal çatlaklar, kaplamada enine oluşan ve sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde daha sık rastlanılan büzülmeden kaynaklı çatlaklardır. Kaplamanın kenar bölgelerinde, yanal destek kuvvetinin yetersiz olduğu kısımlarda ise boyuna görülen çatlaklara da kenar çatlakları denilmektedir. Kenar çatlaklarının oluşmasında drenajın yetersiz olması, sıcaklığın aşırı düşük seviyelere inmesiyle oluşan don olayı ve banket bölgesinin ani kurumasından kaynaklanan nem farkının etkileri fazladır. Yansıma çatlakları ise genellikle yüzey yenileme işlerinde, rijit alt tabakada oluşmuş çatlakların yukardaki tabakaya aynen yansıması sonucu oluşmaktadır.

Asfaltın ve diğer malzemelerin çatlaması üç aşamada gerçekleşir. Önce mikro ölçekli çatlaklar meydana gelir, sonra bu çatlaklar daha da genişleyerek makro ölçekli çatlaklara evrilir, en sonunda ise makro çatlaklar kaplamada yayılıp kırılma ve ayrışmalara neden olmaktadır (Umar vd. 1985).



Şekil 3.13 Kenar çatlakları (a), Termal çatlaklar (b), Blok çatlaklar (c), Timsah sırtı çatlaklar (d) (Anonim 2020e).

3.1.1.2.2.3 Ayrışmalar

Bitümlü kaplamalarda oluşan ayrışmalar, yapısında bulunan agregaların çevresel ve trafik etkileri sonucunda kaplamadan ayrılarak parçacıklar şeklinde kopması sonucunda oluşur. Ayrışma karayollarındaki en fazla görülen bozulma türlerinden biridir ve zamana bağlı olarak artış göstermektedir. Ayrıca sürüş güvenliği ve konforunu olumsuz şekilde etkileyerek kullanım ömrünü de kısaltmaktadır. Oluşan bu kusurun nedenleri ise yapım esnasındaki hatalar, kullanılan malzemelerin kalitesiz ve yetersiz oluşu, agregaların tam kurutulmaması ve temiz olmayışı, serme ve sıkıştırmanın tam olarak yapılamamasıdır. Ayrışma türleri oyuklar, sökülmeler ve soyulmalar olmak üzere çeşitlilik göstermektedir (Tunç 2004).

Oyuklar 25 cm ile 75 cm arasında değişen çaplarda, dairesel şekillidirler. Drenajın yetersiz olması ve alttemel-temel tabakasına zeminden kil yükselmesiyle meydana gelmektedir. Önlenebilmesi için de kaliteli malzeme kullanılmalı, drenaj ve sıkıştırmanın yeterli şekilde ve titizlikle yapılması gerekir (Ağar vd. 1985).

Soyulmalar yol kaplamasının yapısında bulunan agregaları saran bitüm tabakasının nem, kil ve trafik yükleri etkisinde adezyon kuvvetinin zayıflayarak agrega yüzeyinden ayrılmasıyla agreganın açığa çıkması sonucu meydana gelmektedir. Soyulmanın azaltılması için ise bitüm oranının ve viskozitesinin yüksek olması, tam olarak kurutulmuş ve temiz agreganın kullanılması ve bağlayıcılığı yüksek olan kaliteli asfalt kullanılması gerekmektedir.

Sökülmelerin başlıca nedenleri ise agregalarla bağlayıcı arasında oluşan bağın yetersizliğinden, yüzey tabakasının kalınlığının az olmasından, alttaki tabakalarla üstteki tabakaların arasında yapıştırıcı olarak herhangi bir katman kullanılmaması ve sıkıştırmanın yetersizliği nedeniyle oluşmaktadır (Ağar vd. 1985).

3.1.1.2.3 Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler

Karayollarında kullanılan bitümlü sıcak karışımların kullanım ömrü boyunca beklenen performans değerlerini karşılayabilmesi için sağlaması gereken başlıca özellikler, stabilitesinin ve dayanıklılığının (durabilite) yüksek olması, geçirimsiz, esnek

ve işlenebilir olmasının yanı sıra yorulma mukavemeti ve kayma direncinin de yeterli olmasıdır (Önal ve Kahramangil 2012).

3.1.1.2.3.1 Geçirimsizlik (Permabilite)

Bitümlü kaplamaların geçirimsizliği, karışıma nem ve havanın geçişine karşı gösterdiği dirençtir. Geçirgenlik fazlaysa nem ve havanın etkisiyle yaşlanma daha da hızlı gerçekleşir ve soyulmaya karşı mukavemet de düşük olur. Karışım içerisindeki hava boşluklarının hacmi, oranı ve birbirleri ile bağlantı seviyesi yüksek ise, yüzeyde kalan suların ve havanın girişini kolaylaştırarak geçirimsizliği artırır ve donma çözülme etkisinin artmasına neden olur. Bu yüzden de kaplamada bozulmalar oluşarak kullanım ömrü ve konforu azalmaktadır. Kaplamanın sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda da kusmasını ve trafik yükleri altında bir miktar sıkışmasını sağlayacak kadar da sınırlı miktarda boşluk bırakılması da gerekmektedir (Tunç 2004).

3.1.1.2.3.2 İşlenebilirlik

Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirlik özelliği, inşa öncesindeki karıştırma ve inşa sırasındaki sıkıştırma esnasında yaşanan zorluk derecesinin bir ölçüsüdür. Söz konusu bu zorluk karışımın dizayn parametreleri ve agrega gradasyonunun iyi ayarlanmasıyla daha da azaltılabilir. İşlenebilirliğin artırılması için, karışımda kullanılan agreganın maksimum dane boyutunun ve kaba agrega miktarının düşük olması, kırma taştan elde edilen ve yüzey pürüzlülüğü fazla olan agreganın daha az kullanılması, karışım sıcaklığının düşük olmaması, asfaltın bağlayıcı viskozitesinin az olması ve ince daneli agrega ile ara boyutlardaki malzeme oranının da yüksek miktarda olmaması gerekmektedir (Tunç 2004). İşlenebilirlik özelliği az olan karışımların serim ve sıkıştırma esnasında yaşanan güçlükler nedeniyle, homojenlik ve stabilite özellikleri de zayıf olmaktadır. İşlenebilirlik ne kadar yüksek ise trafik yükleri etkisi altında oluklanma da o kadar erken olabilmektedir (Uluçaylı 1998).

3.1.1.3.3.3 Stabilite

Bitümlü kaplamaların stabilitesi, trafik yüklerinin etkisi altında oluşabilecek deformasyona karşı koyabileceği direnç kuvvetine bağlıdır. Bu direnç ne kadar yüksek

olursa trafik yüklerine karşı davranışı da o kadar iyi olur. Direncin düşük olduğu hallerde ise kaplamada deformasyonların oluşması kaçınılmazdır. Stabilitesi yüksek kaplamalar trafik yüklerine karşı geometrilerini ve düzgünlüklerini daha uzun süre koruyabilirler. Aksi takdirde tekerlek izi ve sökölme başta olmak üzere deformasyonlar oluşacaktır (Tunç 2004).

Stabilitenin ne çok az ne de fazla olması istenmeyen bir durumdur. Fazla olduğu durumlarda esnekliğini kaybedecek olan kaplama, oluşacak gerilmeler karşısında çatlayacak ve deforme olacaktır. Kaplamaların stabil olması karışımdaki içsel sürtünme direncinin ve kohezyonun miktarına bağlıdır. Direnç, karışımda kullanılan agregaların yüzey dokularına, gradasyona, geometrilerine, karışımın yoğunluk oranına, kullanılan asfaltın da miktar ve cinsine bağlıdır. Kohezyon ise karışımın kendi şeklini koruyabilme özelliğidir. Kohezyon yükleme hızına ve alanına, sıcaklık ile ters orantıya sahip olan viskoziteye bağlıdır. Agreganın yüzey pürüzlülüğü, köşeli olması ve yoğunluğunun yüksek olması, karışımdaki boşluk oranının az olması, kullanılan asfalt viskozitesinin yüksek olması ve tabak kalınlığının da fazla oluşu stabiliteyi arttıran başlıca etkenlerdir (Tunç 2004).

3.1.1.2.3.4 Esneklik (Fleksibilite)

Bitümlü kaplamaların esnekliği, çevresel etkiler ve trafik yükü etkileri altında, çatlak oluşmadan, sınırlı miktarda eğilebilecek ve temel tabakalarında oluşacak oturmalara uyum sağlayabilecek düzeyde olması yeterliliğine bağlıdır. İstenmeyen oranda ve farklı şekilde oluşan oturma sonucunda kaplamada da çatlaklar oluşacaktır. Bitümlü karışımların fleksibilitesi, bitüm içeriği yüksek ve açık gradasyona sahip agregalar ile oluşturulacak karışımlarla geliştirilebilir (Tunç 2004).

3.1.1.2.3.5 Durabilite (Dayanıklılık)

Bitümlü kaplamaların durabilitesi, trafik yükü etkilerine, iklimsel koşullara, nem ve sıcaklığa karşı gösterdiği dirence bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bu etmenlere ek olarak bitümlü kaplamanın bünyesinde oluşan oksidasyonu, buharlaşmayı, donma-çözünme sonucu kaplamada ve agregada meydana gelebilecek değişiklikleri de katabiliriz. Karışım içeriğindeki bitüm oranı kuma, tekerlek izi ve diğer

deformasyonlara neden olacak kadar fazla, agregayı sararak yaşlanmayı ve boşluk oranını artırarak nem ve hava girişini kolaylaştıracak kadar da az olmamalıdır. Aşınma tabakasının içeriğindeki sert agrega ve bitüm yüzdesinin yüksek olması durabilitenin artırılmasını sağlayacaktır.

Durabilitenin düşük olmasının nedenleri ise, düşük bağlayıcı yüzdesine bağlı olarak agreganın sökülmesi, soyulma direnci düşük agreganın kullanılması, sıkışmanın yetersizliği ve yüksek orandaki boşluklu karışım, bitümlü kaplamanın erkenden kırılıp ayrışmasına sebep olmaktadır (Umar ve Ağar 1985). Karışımdaki ince agregalar yoğun olduğunda, bitümün bu agregaları sararak, kaba agregaları yeteri kadar saramadığı durumlar ortaya çıkmakta, bunun sonucunda da durabilite düşerek tekerlek izi görülmektedir. Optimum oranda mineral agrega kullanılarak yeterli seviyede bitüm film kalınlığı sağlanabilir (Çubuk 2007).

3.1.1.2.3.6 Yorulmaya karşı mukavemet

Yorulma, etkiyen yüklerin tekrar etmesi sonucu oluşur. Kaplamaların yorulma mukavemeti de, trafikten kaynaklı tekrar eden yüklere karşı çatlamaksızın karşı koyabilmesi anlamına gelir. Yorulma ömrünün artması, karışımdaki boşluğun az olmasına, rijitlik ve kalınlığının da fazla olmasına bağlıdır. Özellikleri aynı olan karışımlar, değişik sıcaklık ve sabit gerilmeye tabi tutularak, yorulma ömürlerinin düşük sıcaklıkta daha fazla olduğu belirlenmiştir (Shell bitüm el kitabı 2004).

Bitümlü kaplamalarda oluşan yorulma çatlakları, yavaş fakat sayıca fazla tekrar eden yüklerin etkisiyle oluşurlar. Kalınlığın yetersiz oluşu ve alttaki tabakaların da zayıf olmasıyla birlikte, deformasyonlar ve yorulmaya bağlı çatlakların oluşması kaçınılmazdır. Yorulma çatlaklarının önlenmesi, kullanılan bitümün yumuşak olmasına, rijitliğe, yoğunluk oranına, filler miktarına ve bitüm miktarına bağlıdır (Tunç 2004).

3.1.1.2.4 Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesinin nedenleri

Bitümlü kaplamaların kullanıldığı karayollarında, yolun büyük bir bölümü ihtiyaçları yeterince karşılarken, bazı bölümleri ise etkiyen aşırı yüklere ve çevresel

etkilere karşı yeterli direnci gösteremeyerek deforme olmaktadır. Bu nedenle gün geçtikçe artan trafik etkilerine karşı kullanım ömrünü, performansı ve dayanıklılığı artırmak, yapım ve bakım maliyetlerini ise düşük tutabilmek için kaplamalarda kullanılan bitümün ve bitümlü karışımların modifiye edilmesine gereksinim duyulmaktadır (Asfalt ve uygulamaları 2001).

Birlikler (1998)'e göre bitüm modifiyesi şu sebeplere dayanmaktadır:

- Kalıcı deformasyonu azaltabilmek için, servis sıcaklığının düşük olduğu durumlarda esnek karışımların elde edilmesi,
- Akma ve kuma gibi olumsuzlukları önlemek,
- Bitümlü kaplamaların kullanım ömrünü uzatarak fayda/maliyet oranını artırmak,
- Oluşacak çatlakların önüne geçebilmek veya gecikmesini sağlamak,
- Tekerlek izlerini azaltabilmek için, servis sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda sert karışımların elde edilmesi,
- Karışımlarda Stabilite ve mukavemet değerlerini arttırmak,
- Kaplamaların tabaka kalınlıklarını azaltarak, aşınma tabakalarının incelmelerini sağlamak,
- Kullanım alanlarının çoğalmasını sağlamak,
- Kaplamaların apsorpsiyonunu düşürmek,
- Yaşlanan bitümlü bağlayıcıların gençleşmesini sağlamak,
- Kaplamanın yorulma direnci ve performansını arttırmak,
- Kalitesi düşük olan agregaların kullanılabilirliğini artırmak,
- Soyulmayı azaltabilmek amacıyla, agrağanın daha iyi sarılmasını ve daha kalın bir film tabakasının oluşmasını sağlamak,
- Kaplama yüzeylerinin kayma direncini artırmak.

Uygulama esnasında daha etkili ve ekonomik olması gereken, modifiye bitüm ve bitüm modifiyesi için kullanılan katkı maddelerinde aranılan özellikler ise şu şekilde sıralanabilir:

- Elde edilmesi kolay olmalı,
- Karıştırma sıcaklıklarında özelliğini yitirmemeli,
- Homojen bir karışım oluşmasına olanak sağlamalı,

- Düşük maliyetli olmalı,
- Sıcaklığın düşük olduğu hallerde asfaltın kırılıp parçalanmasına yol açacak sertlikte olmamalı,
- Asfaltın karıştırıldığı ve serildiği esnada, viskoziteyi arttırmadan, sıcaklığın yüksek olduğu yollarda akışkanlık direncini yükseltmemelidir.

Bitüm ile karıştırıldıktan sonra, katkı maddelerinden sahip olması istenilen özellikler şunlardır:

- Depolandığı ve uygulandığı esnada sahip olduğu özelliklerini yitirmemelidir,
- Fiziksel ve kimyasal olarak depolandığı ve uygulandığı esnada stabilizasyonunu korumalı,
- Uygulama sırasındaki sıcaklıklarda agregayı sarabilecek ve püskürtülebilecek akışkanlıkta olmalı,
- İlave donanım gerektirmeden uygulanabilir ve işlenebilir özellikte olmalıdır (Birlikler 1998; Tunç 2001).

3.1.1.2.4.1 Bitümün modifikasyonunda kullanılan katkılar

Bitüm modifiyesinde kullanılmakta olan katkı maddeleri, çok çeşitli olmakla birlikte, ilerleyen zamanlarda teknolojinin de gelişmesiyle daha da artacak ve ekonomik olacaktır. Kullanım alanı ve oranı gitgide artan modifiye bitümlerde, katkı maddesi olarak polimerler ve kimyasal reaksiyonla elde edilen ürünlere ilgi daha da artmaktadır. Polimere dayalı modifikasyonda elastomerler, işlemiden geçirilmiş kauçuklar, plastikler ve fiber malzemelerin temel modifiye katkıları oluşturdukları görülmektedir. Kimyasallara dayalı modifiye çalışmalarında ise katkı reaksiyonu, vulkanizasyon ve nitrasyon reaksiyonları daha fazla görülmektedir (Taşcı 2010).

Kimyasal katkıların bitümün modifiyesinde kullanılmasıyla adezyonunda, yumuşamasında, yaşlanmasında, işlenebilirliğinde, viskozitesinde, sertliğinde ve soyulmasında iyileştirici etkiler görülmektedir (Tunç 2004). Modifiye bitüm çalışmalarında sıklıkla kullanılan ve bitümün hangi özelliğinde değişiklik sağladığı belirtilen katkılar Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Bitüm modifiyesinde kullanılan katkı türleri ve değiştirdiği özellikler (İlcalı 2001).

KATKI TÜRLERİ	DEĞİŞTİRDİĞİ ÖZELLİKLER
Yağ	Bitümün Yapısı, Bağlayıcılık, Viskozite, Penetrasyon Değeri, Yumuşama
Filler Tozu	Yumuşama Noktası, Viskozite, Sertlik, Yoğunluk, Maliyet, Mekanik Sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik, Çatlak Direnci, Viskozite
Balmumu	Viskozite (Sıcak), Sertlik (Soğuk), Bağlayıcılık, Adezyon
App (Ataktik Polipropilen) Eva (Etilen Vinil Asetat)	Sertlik, Penetrasyon Değeri, Frass Kırılma Noktası, Yumuşama Noktası
Sbs (Strien-Bütadien-Strien)	Penetrasyon Değeri, Yumuşama Noktası, Elastik Geri Dönüş, Düşük Sıcaklık Kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma Kabiliyeti, Uygulama Sıcaklığı
Isıtma Ajanları	Islatma Kabiliyeti, Adezyon

3.1.1.2.4.2 Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması

Bitümlü bağlayıcılar modifiye edilirken çok çeşitli katkı ürünleri kullanılmaktadır. Modifiye bitüm katkısı diye adlandırılan bu maddelerin sınıflandırılması Çizelge 3.4’te sıralanmaktadır.

Çizelge 3.4 Bitüm mofiyesinde kullanılan maddelerin sınıflandırılması (İsfalt 2001).

Katkı Tipi		Özellikleri	Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
Filler		-Mineral Filler Taş tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül -Karbon Siyahı -Sülfür	Sertleştirme
Genleştiriciler		-Sülfür -Odun Özü (Lignin)	Sertleştirme
Kauçuk -Doğal Lateks -Yapay Lateks -Blok Kopolimerler -işlenmiş Kauçuk	Polimerler	-Doğal Kauçuk -Strene Butodien veya SBR -Strien Butodien-Strene veya SBS -Dönüştürülmüş Kauçuk -Polietilen	Adezyon
Plastik		-Polipropilen -EVA, Etil-Vinil-Asetat -PVC, Polivinil Klorid	Sertleştirme
Bileşim		-Plastik ve Kauçuk Polimerlerin Karışımı	Adezyon
Fiber		-Doğal: Asbest, Taşyünü -Yapay: Polipropilen, Polyester, Fiberglas	Sertleştirme
Oksidan		-Manganez Tuzu	Sertleştirme
Antioksidan		-Kurşun Karışımları -Karbon -Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
Hidrokarbon		-Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları -Sertleştirme ve Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
Soyulma Önleyici		-Aminler -Kireç	Yumuşatma

3.1.2 Nanomalzemeler ve özellikleri

Yunan dilinde cüce manasında kullanılan “Nano” sözcüğü, bilimsel alanda ise bir metrenin milyarda birini ifade eder. Bu oran insan saçının yüzbinde bir kalınlığındaki bir boyutu ifade eder (Wilson et al. 2002). 1-100 nm ölçüsündeki materyallerin, cihaz ve yapıların üretilmesi, kullanılması ve incelenmeleri de nanoteknolojinin alanına girmektedir (Ramsden 2011). Fizik, kimya, tekstil, bilişim ve biyolojik canlılara kadar geniş bir yelpazede bilimsel çalışma alanı bulunan nanoteknolojiye dünya genelinde ayrılan kaynak miktarı 3,8 milyar euroyu bulmuştur

(Fulekar 2010). Makro boyuttaki ürünlerin katma değeri 1 birim olarak baz alındığında, mikro ürün ve materyallerin katma değeri 100 birim, nanoteknolojik ürün ve materyallerin katma değeri ise 10.000 birim olacak bir potansiyeli bulunmaktadır (TÜBİTAK 2004).

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de, kullanım ve uygulama alanları gün geçtikçe çoğalan nanoteknolojiyle ilgili çalışmalar daha da önem kazanmaktadır. Vizyon 2023 yol haritasında öncelikli olarak yürütülmesi istenilen nanoteknolojiyle ilgili faaliyet branşları nanofotonik ve nanoelektronik, nanofabrikasyon, nanomalzemeler, kuantum bilgi işleme, nanobioteknoloji ve nanokarakterizasyondur (TÜBİTAK 2004).

Nanomaddelerin kullanımı yeni değil, 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Ticari alanda, karbon karasının kullanımı lastikler başta olmak üzere farklı alanlarda da mevcuttur. Lastiklerin ömürlerini uzatabilmek ve rengini siyaha çevirmek için hammadde olarak karbon karası 1900' lü yılların başlarından itibaren kullanılmaktadır. Silisyum kauçuğu bileşenlerinden biri olan silika isi, yapışkan ve dolguda kullanılan macunlar da nanomaddeler olarak geçmektedir (Wilson et al. 2012).

Nano boyuttaki malzeme ve ürünlerin en büyük avantajı, çok yüksek oranda yüzey alanına sahip olmalarıdır. Bu da, karıştığı malzemeye daha fazla yapışma alanına sahip olacağı ve kaynaşacağı anlamına gelir. Örnek vermek gerekirse, 1 birim ebatlarındaki küpün toplam yüzey alanı 6 birim karedir. Oysa bu küpü nano boyutlarda milyonlarca hatta milyarlarca parçaya ayırdığımızda ise toplam yüzey alanı ilk halindeki yüzey alanından milyonlarca kat fazla olacaktır (Arivalagan et al. 2011).

3.1.2.1 Nanomalzemelerin elde edilmesi

Nanomalzemelerin elde edilmesinde, malzemenin fiziksel, kimyasal ve şekilsel özelliklerine bağlı olarak çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri “Bottom Up” olarak tabir edilen, aşağıdan yukarıya, diğeri ise “Top Down” olarak adlandırılan yukarıdan aşağıya yöntemleridir.

Top Down yönteminde, kütle halindeki malzemelere mekanik olarak ya da kimyasallarla enerji verilerek nano ölçekli parçacıklara ayrılması sağlanmaktadır. Bu

yöntemde mekanik öğütmenin yanı sıra aşındırma da tercih edilebilir. Kullanılan bu tekniklerde standart öğütme yöntemine göre tüketilen enerji miktarı çok fazladır. Bu yöntem yüksek hızlı değirmen olarak da isimlendirilmektedir. Bottom Up yönteminde ise tam tersi, atom ve moleküller kimyasal reaksiyonla sentezlenerek büyütülmesi sağlanır (Yazıcı 2009).

3.1.2.2 Nanomalzemelerin inşaat mühendisliği alanında kullanımı

Nanomalzemeler birçok sektörde kullanıldığı gibi inşaat sektöründe de sorunları gidermek ve mevcut durumları daha da iyileştirmek için çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanıldığı başlıca konular şu şekilde sıralanabilir:

- Camların yansıtıcı özelliklerinin iyileştirilmesinde,
- Bakım periyodu daha uzun kaplama ürünlerinin üretilmesinde,
- Akustik özellikteki malzemelerin absorbe özelliklerinin artırılmasında,
- Ağırlığı azaltılmış, dayanıklılığı artırılmış kompozit malzemelerin üretiminde,
- Boruların birleşiminde kullanılan malzemelerin ve yöntemlerin iyileştirilmesinde,
- Alev geciktirici ürünlerde ısı transfer özelliğinin yavaşlatılmasında,
- Çimento esaslı malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesinde (Ge and Gao 2008).

Yapı alanında kullanımı yaygın olan bazı nanomalzemeler de aşağıdaki Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.5 Yapı alanında kullanılan nanomalzemeler ve faydaları (Demirdöven ve Arditi 2012)

Nano Malzemeler	Yapı Malzemeleri	Beklenen Faydalar
Karbon Nanotüpler (CNT)	Beton, Seramik Cihazlar (Nanoelektro-Mekanik/ Mikroelektro-Mekanik) Güneş Pili	Sağlamlık Çatlamayı Önleme Geliştirilmiş Mekanik ve Termal Özellikler Sağlık İzleme Etkili Elektron İletimi
Silisyum Dioksit Nano Parçacıklar (SiO ₂)	Beton Seramik, Cam	Mekanik Mukavemete Katkı, Soğutma, Işık İletimi, Ateşe Dayanıklılık ve Tutuşmazlık, Yansıma Önleme
Titanyum Dioksit Nano Parçacıklar (TiO ₂)	Beton, Cam Güneş Pili	Hızlı Hidratasyon Hidratasyon Düzeyini Artırma Kendi Kendini Temizleme, Süper Su Emicilik, Buğulanma Önleme Kirlenmeye Direnç Elektrik Üretimi
Demir III Oksit Nano Parçacıklar (Fe ₂ O ₃)	Beton	Basınç Dayanımını Artırma, Aşınmaya Dayanıklılık

Nanomalzemeler bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesi çalışmalarında da kullanılmakta ve bazı özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu değişiklikler, enerjiden ve maliyet kalemlerinden tasarruf etmek, Ultra Viyole ışımalarının etkisiyle yaşlanmaya karşı direnci arttırmak, depolama stabilitesini arttırmak, asfalt kaplamalarda durabiliteyi arttırmak, bakım maliyetlerini düşürmek, düşük sıcaklığa maruz kalan kaplamanın performansını iyileştirmek ve neme karşı duyarlılığı azaltmak olarak sıralanabilir (Yang and Tighe 2013). Nano boyuttaki bazı metaller, ağır yağlar ve bitümün farklı uygulamalarda enerjiden tasarruf sağlanabilmesi için, viskozite değerini düşürebilmek amacıyla etken katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur (Shokrlu and Babadağlı 2010).

3.1.2.3 Nano krom oksit

Kromun doğada iktisadi olarak işlenebilmesini sağlayan sadece Kromit mineralidir (Şekil 3.14). Basit mineral formülü ise FeCr₂O₄'tür. Metalurji alanında Krom cevherinin kullanıldığı en değerli alan paslanmaz çelik yapmakta kullanılan ferro-

krom işlemesidir. Dünyadaki krom üretiminden %79 ile metalürji alanında, %13 ile kimya sektöründe ve %9 ile de refrakter (yüksek ısıya dayanıklılık) sektöründe yararlanılmaktadır. Sanayide kullanılışı kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri nedeniyle sınırlı olmakla birlikte, teknolojik gelişmeler bu özellikleri nedeniyle ortaya çıkan sınırlamaları daha esnek hale getirmiştir. Dünyadaki kromit kaynakları yaklaşık 7,6 milyar tondur. Bu miktarın ise 3,6 milyar tonluk kısmı rezervedir (Anonim 2020c).



Şekil 3.14 Krom (Anonim 2018b).

Krom oksit yeşil kristalcikler halinde bulunur (Şekil 3.15). Moleküler formülü Cr_2O_3 , yoğunluğu $5,22 \text{ g/cm}^3$, mol ağırlığı 152 gr ergime sıcaklığı 1.990°C 'dir ve suda çözünmez özelliğe sahiptir. Tozu asit ve alkaliler içinde çözünürlüğe sahiptir. Günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip krom oksit, 1802 yılına dek bilinmemektedir. Krom oksit ilk defa Sevr'de kullanılmıştır. Krom oksit kullanılarak üretilen ilk pigment koyu yeşildi. Sonraki zamanlarda krom kalay pembesi İngiltere'de kullanılmıştır. Krom oksit, esas olarak sırları krom yeşili denen renge boyar. Krom oksidin alüminyum ya da silikonla reaksiyona girmesi sonucu krom metali elde edilmektedir. Düşük sıcaklık seviyelerinde %1 oranında eklenmesiyle bol kurşunlu olan asidik sırlarda sarı renk tonları elde edilmektedir. SiO_2 oranı arttığında krom kırmızısı sırlarda kahverengiden yeşile dek renk değişimlerine sebep olmaktadır. Kullanıldığı alan olarak da, mürekkep sektöründe kâğıt paraların baskı mürekkebi üretiminde katkı maddesi olarak kullanılır. Boya üretiminde ise renklendirici özelliği nedeniyle kullanışlıdır. Seramik sektöründe, deri ve yapı malzemeleri üzerine boyama maddesi

olarak da kullanılmaktadır. Birçok değişik alanda kullanılan bu madde metal krom eritmek için de kullanılmaktadır.



Şekil 3.15 Nano krom oksit tozu.

Krom karbür ile organik sentetik krom analiz çalışmalarında katalizör madde şeklinde seçilebilmektedir. Krom, çeliğin paslanmaz özellik kazanabilmesi için en gerekli elementtir. Oksijen ile temas etmesi durumunda ince bir film tabakası oluşturur. Krom oksit tabakasını teşkil eden bu element, çelik ile oksijen temasının engellenmesini sağlar. Böylece çelik paslanmaya karşı çok daha dayanıklı olur. Çeliğin ihtiva ettiği krom oranını arttırdığımızda, çelik korozyona karşı aynı ölçüde dayanıklılık kazanır. Ayrıca, bu katmanın herhangi bir sebeple zedelenmesi, açılması ya da çizilmesi halinde oluşabilecek açıklık, çok seri bir biçimde katmanın kendini yenilemesi sayesinde tekrar oluşabilmektedir. Buna pasivasyon denilir ve titanyum benzeri diğer metallerde de görülebilmektedir (Anonim 2019b).

Krom oksit, aşınma direncinde, elektronikte, optik ve daha birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Krom oksit kaplamalarda, kimyasal tepkime, mekanik dayanıklılık, korozyon önleyicilik, aşınmaya karşı direnç, sertlik gibi özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Hones et al. 1999).

3.1.3 Ömrünü tamamlamış lastikler

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, insan sağlığını korumak ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla, kullanılmış ürün ve malzemelerin geri dönüşümü konusunda ciddi yatırımlar yaparak tesisler inşa etmekte ve ekonomik olarak da pozitif kazanımlarda bulunmaktadır. Kullanılmış lastikler de içeriğinde bulunan petrol türevi ve çeşitli kimyasal maddeler ile geri dönüşümündeki zorluklar nedeniyle doğaya ve insan sağlığına karşı tehdit oluşturmaktadır. Şekil 3.16’da görülen, araç üzerindeki ekonomik kullanım süresini doldurduğu belirlenerek araçlardan çıkan orijinal ya da kaplama işlemi görmüş ve bir daha araçlarda kullanılması mümkün olmayan lastikler “Ömrünü Tamamlamış Lastik” olarak adlandırılmaktadır (Anonim 2020a).



Şekil 3.16 Ömrünü tamamlamış lastikler.

Ömrünü Tamamlamış ya da kusurlu üretilmiş araç lastiklerinin geri dönüşümünde Piroliz (Yüksek Isıda Geri Kazanım) yöntemi kullanılmakta ve bu yöntemle %100’e yakın oranda geri dönüşüm sağlanmaktadır. Bu yöntem kimyasal olmayan bir teknik olduğundan çevreye ve doğaya herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamakta, ayrıca süreç sonunda elde edilen tüm ürünler tekrar kullanılabilir özellikte ve depolanması daha kolaydır. Bu teknikler ile elde edilip, yüksek kalori

değerli pirolitik yağlar, mevcut haliyle kullanılmakla beraber, rafinaj işleminden sonra motorin ve benzer akaryakıtlar olarak da kullanılmaktadır (Anonim 2020b).

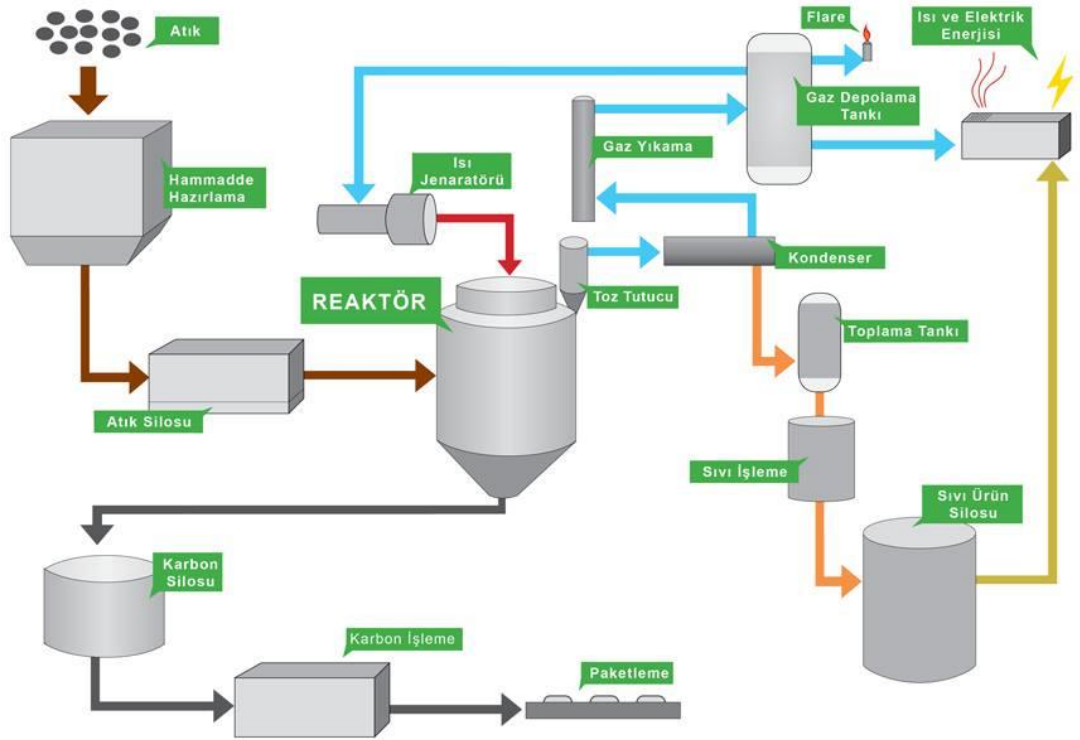
Çok çeşitli ham maddeler kullanılarak üretilen lastiklerin yapımında 200'e yakın bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenler 5 ana başlıkta şöyledir, doğal kauçuk, sentetik kauçuk, karbon karası ve silis, metal ve tekstik teller ile lastikten istenilen özelliklere göre değişkenlik gösteren silika ve antioksidanlar gibi birçok kimyasal etken madde bulunmaktadır (Anonim 2014). TÜİK 2018 istatistiki verilerine göre Türkiye genelinde toplam kayıtlı motorlu kara taşıtları sayısı 2018 yılında 22 milyon 850 bin oldu. 2020 yılının Nisan ayında ise bu sayı 23 milyon 398 bin 837 olmuştur. Bu kapsamda araç lastiklerinin pazar payı da bir o kadar arttı (Anonim 2020g).

3.1.3.1 Piroliz yöntemi

Piroliz kısaca, ısı etkisi altında maddenin bileşenlerine ayrılma işlemidir (Şekil 3.18). Vakumlu hücrelerde ısıtılan biyokütle, katı, sıvı ve gaz fazında bileşenlerine ayrıştırılır. Katı fazdaki yakıtlar karbonizasyon, sıvı ve gaz fazındakiler ise piroliz diye adlandırılmaktadır. Pirolizde işlem sıcaklığı 500 ile 800 °C aralığında gerçekleşirken, sıvılaştıran bileşenler 300 °C civarında çıkışa uğramakta, bu çıkış 550 ile 600 °C'lere kadar devam etmektedir. Gaz fazındaki bileşenler ise 900 ile 1.000 °C' den sonraki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Karbonizasyon sırasında erişilen maksimum sıcaklıkta maddenin yapısı etkilenmektedir (Özbay 1998). Pirolizden elde edilen ürünlerin verimi, bileşimindeki maddelere, pirolizin sıcaklık seviyesine, ısıtmanın hızı ve alıkonma süresine göre değişkenlik göstermektedir. Piroliz esnasında ortaya çeşitli gazlar ve bir miktar da su buharının ortaya çıktığı görülür. Sıvı ürünlerin verimini etkileyen en etkili yöntem hızlı pirolizdir ve sıcaklığın 500 °C'ye ulaştığı esnada maksimum verime ulaşılmaktadır. Bu oran yaklaşık %80 seviyesine ulaşabilmektedir (Hicks et al. 1983).



Şekil 3.17 Piroliz ünitesi.



Şekil 3.18 ÖTL'in piroliz işleyiş şeması (Anonim 2020f).

Pirolizin uygulama şartlarına ve sıcaklığa bağlı olarak, değişik teknoloji ve tekniklerde sınıflandırılması mümkündür. Bunlar, geleneksel yöntem, yavaş ve hızlı piroliz ile flash piroliz yöntemleridir. Bunların yanı sıra, hidropiroliz, ultra piroliz, vakum pirolizi ve ablative gibi ileri piroliz yöntemleri de bulunmaktadır (Çizelge 3.6).

Deneyisel çalışmalarda kullanılan katkı maddelerinin temin edildiği Erzincan OSB’de bulunan ERA Çevre Teknolojileri Anonim Şirketi yaptığı piroliz işlemi sonucunda ÖTL’den yaklaşık, %30-32 yağ, %30 karbon siyahı , %25 ince-kalın çelik tel, %13-15 gaz elde edildiğini, yağın ise ayrıştırma kuleleri ve kondenserlerden çıkarak yoğunlaşan, %70 ağır ürün, yoğunlaşmadan çıkan %30’unun ise hafif ürün olduğunu belirtmiştir (Şekil 3.17). Elde edilen ağır ve hafif yağlar ısı üretmek amacıyla brülörlerde ve dizel jeneratörlerde elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Çizelge 3.6 Piroliz yöntemleri ve elde edilen ürünler (Bridgwater 1990).

Teknoloji	Alıkonma Süresi	Isıtma Hızı	Sıcaklık (°C)	Ürün
Karbonizasyon	Günlerce	Çok Düşük	400	Katı
Geleneksel	5-30 dk.	Düşük	600	Katı, Sıvı, Gaz
Hızlı	0,5-5 s.	Çok Yüksek	650	Biyoyakıt
Flash (Sıvı)	< 1s.	Yüksek	< 650	Biyoyakıt
Flash (Gaz)	< 1 s.	Yüksek	< 650	Gaz, Kimyasallar
Ultra	< 0,5 s.	ÇokYüksek	1000	Gaz, Kimyasallar
Vakum	2-30 s.	Orta	400	Biyoyakıt
Hidropiroliz	< 10 s.	Yüksek	< 500	Biyoyakıt
Metanoliz	< 10 s.	Yüksek	< 700	Kimyasallar

3.1.3.2 Pirolizi etkileyen faktörler

Piroliz sürecini etkileyecek başlıca parametreler ise, piroliz ortamı, sıcaklık, parçacık boyutu, katalizörler, ısıtma süresi ve hızı, reaksiyon süresi ve basıncıdır.

Piroliz, sıcaklığa bağlı olarak üç safhada gerçekleşmektedir. 100 ila 300 °C aralığındaki sıcaklıklarda, uçucu madde çıkış miktarı düşüktür. Karbonoksitlerle su buharı oluşur. Uçucu maddelerin %75 civarında açığa çıktığı ikinci evre olan aktif safhadır. Son safha ise genelde kömür için geçerli olmaktadır. Burada katı ürünün oluşmasının yanında, tekerrür eden gazlaştırma olayı gerçekleşmekte ve yoğunlaşmamış gazların ve hidrojenin ortaya çıktığı görülmektedir (Hicks et al. 1983).

Rahman et al. (2001), yaptıkları çalışmada, sıcaklığın 600 °C olduğu piroliz işleminde sıvı ürünün verim oranının maksimum olduğunu tespit etmiş, 35 dakika olan reaksiyon süresini 5 dakikaya indirdiklerinde verim artışını %16'dan %27,6 seviyesine çıkarmışlardır.

Uçucu maddelerin verimini etkileyen önemli bir etken de basıncıdır. Basıncın yüksek olduğu piroliz işleminde, parçalanma reaksiyonu hızlanır, hafif hidrokarbon gaz çıkışı artar. Basıncın düşük olduğu halde ise, hafif yağlar ile katranın verimi yükselir (Hicks et al. 1983).

Pirolize uğrayan parçacıkların boyutu ne kadar küçük ise o kadar iyi ısınacak ve verim de o kadar artacaktır. Parçacık boyutunun büyüdüğü halde ise ısınma yavaş olacak ve verim de düşecektir (Hicks et al. 1983).

Pirolizin gerçekleştiği ısıtma hızının da verim açısından önemi fazladır. Yavaş gerçekleşen piroliz, uçucu ürünlerin tekrar tekrar parçalanmasına imkân verdiğinden hızlı pirolizde verim daha yüksek olmaktadır (Erşahan ve ark. 1996).

3.2 Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde, yol üst yapısında kullanılan bitümlü bağlayıcıların özelliklerini belirlemek ve ilgili teknik şartnamelere uygunluklarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler açıklanmaktadır. Bu deneyler Türk Standartları (TS EN), Amerikan Devlet Yolu ve Ulaştırma Yetkilileri Derneği (AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials) ve Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM American Society for Testing and Materials) standartlarına göre yapılmaktadır.

3.2.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyonun kelime anlamı delme, nüfuz etme, içine işleme anlamına gelmektedir. Penetrasyon deneyi, bitümün penetrasyon derecesini yani kıvamlılığını ölçmek amacıyla yapılan bir deneydir. Deneyin yapılışında standart boyutlara sahip 2 inç uzunluğunda, 1-2 mm çapındaki paslanmaz özellikte çelik malzemeden yapılmış bir iğne kullanılarak, 25 °C sıcaklıkta, 100 gramlık sabit bir yük altında 5 saniye süren,

numunenin içerisine girdiği miktarın desimilimetre (dmm) yani 1 milimetrenin onda biri ölçüsündeki değerine penetrasyon değeri denilmektedir. Batma miktarı 10 mm olan numunenin penetrasyon değeri 100 demektir. İğnenin ucu serbest bırakmadan önce numuneye teğet olacak şekilde sabitlendikten sonra deneye başlanır ve deney süresi 5 saniyede tamamlandıktan sonra cihaz üzerindeki değer okunur. Kıvamlılık ve penetrasyon ters orantılıdır. Numune yumuşaksa batma miktarı yani penetrasyonu yüksek, batma miktarı az ise penetrasyonu düşük yani sert anlamına gelmektedir (İsfalt 2001).

Bu deney hassas bir işlem olup titizlikle yapılması gerekmektedir. Oluşacak ufak bir sapma ya da sıcaklık değerindeki küçük bir farklılık, sonucu değiştirebilecek öneme sahiptir. Numune deney yapılmadan önce etüvde ısıtılarak deney kabına boşaltılır, 2 saat oda sıcaklığında, sonrasında ise 25 °C'deki su banyosunda da 60-90 dakika bekletilip, yine aynı sudan test kabına doldurarak numunenin sıcaklığının değişmemesi sağlanmalıdır. Numunenin düzgün hazırlanmasında, deney yapılacak iğnenin yanlış konumlandırılmasında ve ucunda herhangi bir kalıntı ya da düzensizlik olmaması durumunda deney daha hassas ve doğru sonuç verecek şekilde yapılmış olacaktır. Deneyde 2 dakika içerisinde, numunenin en az 3 ayrı noktasına uygulanarak bulunan değerlerin ortalamasının alınmasıyla sonuç belirlenir (İsfalt 2001).

3.2.2 Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi, penetrasyon derecesine sahip bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki performansının görülebilmesi ve kıvamlılığının tespit edilmesi için yapılmaktadır. Penetrasyon derecesi aynı olan farklı iki bitümün yumuşama noktası değerleri de farklılık gösterebilir. Penetrasyon deneyinin yanı sıra yumuşama noktası deneyi de bitümlerin sınıflandırmasında kullanılmaktadır. Bu deney bitümün 30 ila 150 °C aralığında yumuşama noktasını tespit etmek amacıyla uygulanan bir yöntemdir.

Deneyde, 80 °C ve üzerindeki yumuşama noktasına sahip bitümler için gliserin, 80 °C altındakiler için ise su banyosu kullanılır. Kullanılan sıvının sıcaklığının dakikada 5 °C artması gerekmektedir. Pirinçten yapılmış 2 adet halka içerisine ısıtılarak akışkan hale getirilen bitüm numunesi taşmayacak şekilde dökülerek düzeltildikten sonra, oda sıcaklığında soğuması beklenir. Soğuduktan sonra, sıvı sıcaklığı 5 °C olan deney kabına

koyularak burada da 15 dakika beklenir. Ağırlığı 3,50 gr, çapı 9,50 mm olan çelikten yapılmış bilyeler halkaların içine koyularak ısıtılmaya başlanır. Bilyelerin sıcaklıklarının da 5 °C olması deneyin daha doğru sonuç alınmasını sağlar. Isıtılan numuneler, bilyelerin ağırlığıyla deforme olarak 2,5 cm altında bulunan plakaya temas eder ve temas anındaki sıcaklıkları kaydedilir. İki numunenin temas ettiği andaki sıcaklıkların ortalaması alınır ve bu değer yumuşama noktası değeri olarak tespit edilmiş olur. İki numunenin yumuşama noktası sıcaklığı arasındaki fark 1°C den daha fazlaysa deney tekrardan yapılır.

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarını belirlemek için yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinin kullanılmasıyla bulunan indekse Penetrasyon İndeksi (PI) denilir. Bu değerın hesaplanabilmesi için, bitümün 25 °C'deki penetrasyon değeri (Pen_{25}) ve yumuşama noktası değeri (YN) kullanılarak eşitlik (3.1) ile hesaplanmaktadır. Isıya karşı duyarlılık attıkça PI değeri -2 den düşük, ısıya karşı duyarlılık azaldıkça ise PI değeri +2 den daha büyük çıkmaktadır (Read and Whiteoak 2003).

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

3.2.3 Parlama noktası deneyi

Parlama noktası deneyi genellikle 79 °C üzerindeki parlama noktasına sahip, özellikle içerisinde katbek yağlarının ve yanıcı gazların bulunduğu katran ve asfalt gibi pertol türevi ürünler için uygulanır. Bu değerin tespiti bitümlü sıcak karışımların üretim ve uygulaması esnasında tehlikeli durumların oluşmaması için, uygun sıcaklık koşullarının tespit edilmesinde kullanılır (İsfalt 2001).

Deney kabına ısıtılarak akışkan hale getirilen belli bir miktar bitümlü bağlayıcı koyularak, yavaş yavaş ısıtılır. Kap içerisine sıcaklığı takip edebilmek için 350-400 °C sıcaklığı ölçebilecek kapasitede bir termometre yerleştirilir. Numune sıcaklığı dakikada 14 ila 17 °C arttırılarak, tahmini parlama noktasına yaklaşıldığında dakikada 5 ila 6 °C artacak şekilde ısıtılmaya devam edilir. Deney aleti üzerinde bulunan ve sürekli yanan alev numune üzerinden 1 saniyede geçecek şekilde gezdirilir. Sürekli bir tutuşma

olmadan, parlama meydana geldiği andaki sıcaklık termometreden okunarak parlama noktası belirlenmiş olur.

3.2.4 Bitüm özelliklerini belirlemede uygulanan Superpave deneyleri

Yüksek performansa sahip bitümlü bağlayıcıların, doğal şartlar altındaki performanslarını belirleyebilmek için yapılan deneylerle, sahip oldukları özelliklerin ilgili Superpave şartnamesine uygun olup olmadıkları belirlenir. Yapılan bu deneylerle bağlayıcının yaşlanmaya karşı davranışı, işlenebilirliği, oluklanmaya, yorulmaya ve sıcaklık etkilerine karşı gösterdiği performans seviyeleri ölçülmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlanmalarını (oksidasyon) sağlayabilmek amacı ile Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) deneyi, uzun dönem yaşlanmalarını sağlayabilmek içinse Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV) deneyi yapılmaktadır. Orta ve yüksek sıcaklıklardaki performans özelliklerinin belirlenebilmesi için ise Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi, düşük sıcaklıklardaki davranış özelliklerinin belirlenmesinde ise Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme Deneyi (DTT) yapılmaktadır (Dinç 1999).

3.2.4.1 Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi

Superpave şartnamesi, yol kaplamasında ortaya çıkabilecek kalıcı deformasyonları, yorulma çatlaklarını ve düşük sıcaklıklarda oluşabilecek çatlakları minimuma indirerek, bağlayıcının performans seviyesini maksimuma çıkarabilmek ve ölçebilmek için tasarlanmış bir şartnamedir (Cominsky et al. 1994).

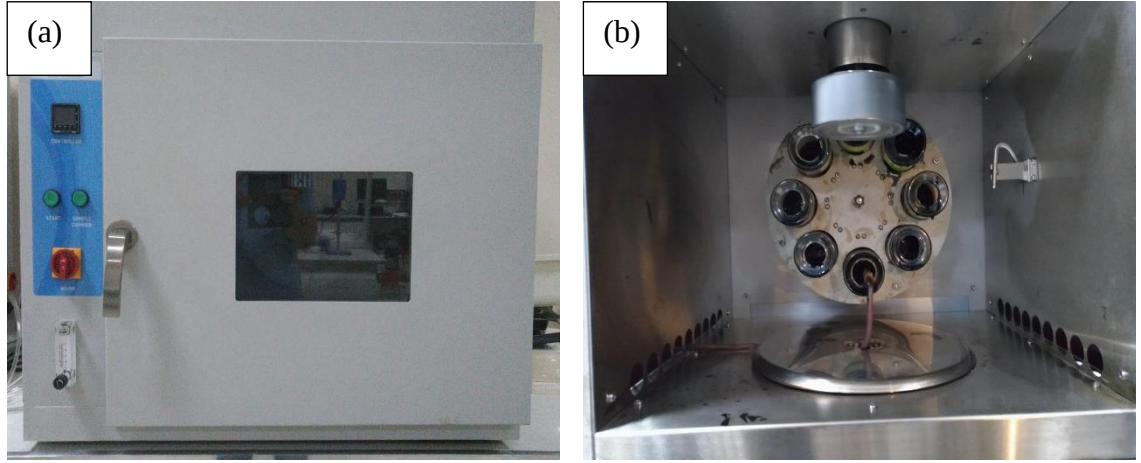
Superpave şartnamesinde bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılmasında dikkate alınan kriterler, yüksek ve düşük sıcaklıklar altında gösterdikleri performansa göredir. Sınıflandırmada ise Performance Grade (PG) yani performans dereceli bağlayıcı olarak PG simgesi ile sınıflandırılırlar. Örnek vermek gerekirse, PG 64-22 sınıfındaki bir bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesi 64, düşük sıcaklık derecesi ise -22 olarak tespit edilmiştir. Yani özelliklerini yitirmeden hizmet edebileceği kaplama sıcaklığı maksimum 64 °C, minimum ise -22 °C olarak belirlenmiş demektir (McGennis et al. 1995).

Bu şartnamenin sağladığı en mühim özellik, asfalt kaplamanın hizmet süresi boyunca karşılaştığı kritik şartların deneyler yardımıyla belirlenebilmesidir. Saf bağlayıcılar ile yapılan deneyler taşımada, depolamada ve işlenme sırasında karşılaşılan koşulları temsil etmektedir. Bir sonraki safha ise, karışımın hazırlanması ve serilmesi esnasındaki malzemeyi temsil etmektedir. RTFOT yaşlandırma deneyi ile bağlayıcının ısıyla ve basınçlı havayla okside olması sağlanarak serilme esnasındaki sertleşmesi ölçülebilir. Son safhada ise PAV yöntemi ile uzun sürede maruz kalabileceği koşullar sağlanarak yaşlandırılması sağlanır (Öztürk ve Çubuk 2004).

Trafik hacmine göre, tasarım hacminin 10 milyon eşdeğer dingil yükünün üzerine çıktığı hallerde, performans sınıfının arttırılması önerilmektedir. 30 milyon eşdeğer dingil yükünün aşıldığı hallerde ise yüksek sıcaklık sınıfının bir üst sınıftan alınması öngörülmektedir. Trafik hızının yavaş olduğu koşullarda da (20 ila 70 km/h) yüksek sıcaklık sınıfının bir üst sınıftan, trafiğin durağan olduğu yani 20 km/h den daha düşük trafik hızları için ise iki üst sınıftan seçilmesi önerilmektedir (WesTrack Forensic Team Consensus Report 2001).

3.2.4.2 Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deneyi

Bu işlem deneysel olmasının yanı sıra, bitümlü bağlayıcının karıştırma ve serim aşamasındaki kısa dönem yaşlanmasını temsilen ve bitümün özelliklerinin araştırılacağı diğer deneylerde kullanılmak üzere yaşlandırılmış numunelerin kullanılabilmesini sağlamaktır. Deney sonucunda ise elde edilen yaşlanmış numunelerin kütle kayıpları hesaplanarak, şartname sınırları içerisinde kalıp kalmadığı belirlenmiş olur. Bu deneyde bitümlü bağlayıcının karışım sırasındaki sertleşmesini temsilen, hava ve ısının birlikte etki ettiği hallerdeki davranışı değerlendirilir. Oluşan kütle kaybı belirlenerek, fiziki özelliklerinin değişimini inceleyebilmek için gerekli olan numuneler elde edilmektedir. Deneyde aynı özellikteki silindirik sekiz cam şişe kullanılarak, sıcaklık 163 °C'ye ulaştığında deney başlatılır (Lav et al. 2004).



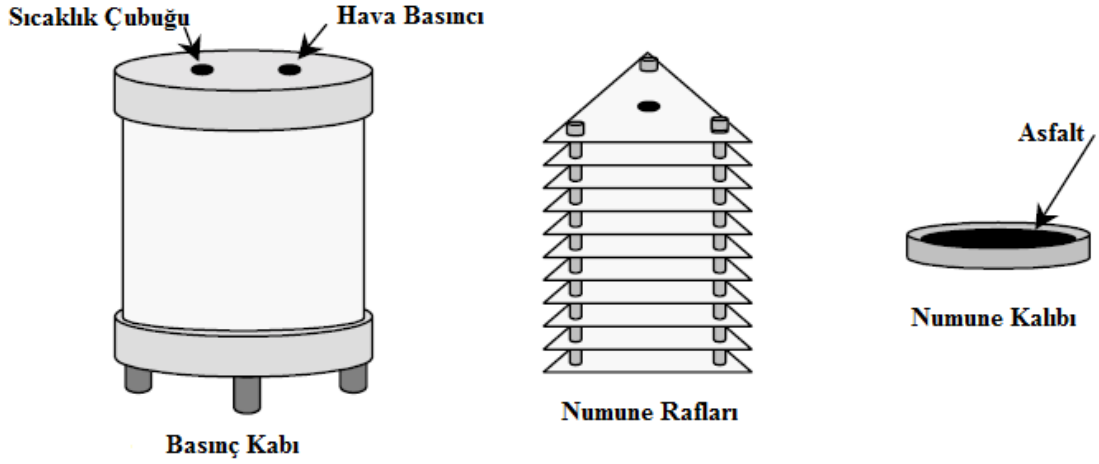
Şekil 3.19 (a) RTFOT deney aleti dış görünüş, (b) RTFOT deney aleti iç görünüş.

Deney yapılırken, tüm şişelerin içerisine 35 gr bitümlü bağlayıcıyı ekleyip dikey ekseninde 15 d/d hızda 85 dakika boyunca döndürülür (Şekil 3.19). Dönüş sırasında deney aleti içerisindeki hava üfleyiciyle şişelerin içerisine, akış hızı 4.000 ± 200 ml/dk olacak biçimde basınçlı hava verilmektedir. Sıcaklık etkisi altındaki bitüm, şişelerin iç yüzeyini tamamıyla kaplayacak şekilde ince bir film tabakasının oluşmasını sağlamaktadır. Bu şekilde yaşlanma olayı daha da kolay hale gelmektedir. Deney sonlandığında numunelerden ikisi kütle kaybının belirlenebilmesi amacıyla, diğer altı numune ise bitümlü malzemenin yaşlandırmadan sonra incelenecek fiziksel özelliklerinin tespiti amacıyla kullanılır. Kütle kaybının hesaplanmasında ise aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır. Formüldeki M_1 yaşlanma öncesi kütleyi, M_2 ise yaşlanma sonrasındaki kütleyi ifade eder (TS EN 12607-1 2015).

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] * 100 \quad (3.2)$$

3.2.4.3 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

Bitümlü bağlayıcıların uzun dönem yaşlandırılmasını sağlamak amacı ile yapılan bu deney, kaplamanın hizmet ömrü süresince karşılaşılabilecek etkilere karşı gösterdiği davranışı belirleyebilmek amacıyla yapılmaktadır (Tunç 2004).



Şekil 3.20 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney aleti (Reubush 1999).

Deneyde, RTFOT ile yaşlandırılmış 50 gram ağırlığındaki numuneler ısıtılarak akışkan hale getirildikten sonra, 12,5 cm çapındaki çelikten imal edilmiş deney kaplarına boşaltılarak raflara yerleştirilir (Şekil 3.20). Kapalı kaptaki 20 saat süresince 2.070 kPa yüksek basınç altında, 90 ila 110 °C sıcaklıkta yaşlandırılması sağlanır. Sıcaklık seviyesi kullanılan bitümlü bağlayıcının cinsine göre değişiklik göstermektedir. Deney yapıldıktan sonra elde edilen yaşlanmış numuneler BBR, DSR ve DTT deneylerinde kullanılmak üzere muhafaza altına alınır (Tunç 2004).

3.2.4.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

Kaplamanın düşük sıcaklıklardaki davranışını belirleyebilmek amacıyla, RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış numuneler kullanılarak kiriş şeklinde hazırlanmış numuneler sabit bir yük altında eğilmeye maruz bırakılır. Bu işlem sıcaklık sıfır derecenin altında gerçekleştirilir. 125x12,5x6,25 mm ebadındaki kiriş numunelerinin 100 gramlık yük etkisinde zamanla oluşacak sehim miktarı tespit edilir. Deneyin yapılışında bilgisayar yazılımı kullanılır ve bu yazılım sayesinde zamana bağlı deformasyon ve sünme sertliği grafiklerinin çizilmesiyle (Şekil 3.21), 60. saniye sonunda oluşan Sünme Sertliği (S) ve Sünme Oranı (m) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır (Dinç 1999).

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3 \delta(t)} \quad (3.3)$$

$S_{(t)}$: t anındaki sünme sertliği (MPa)

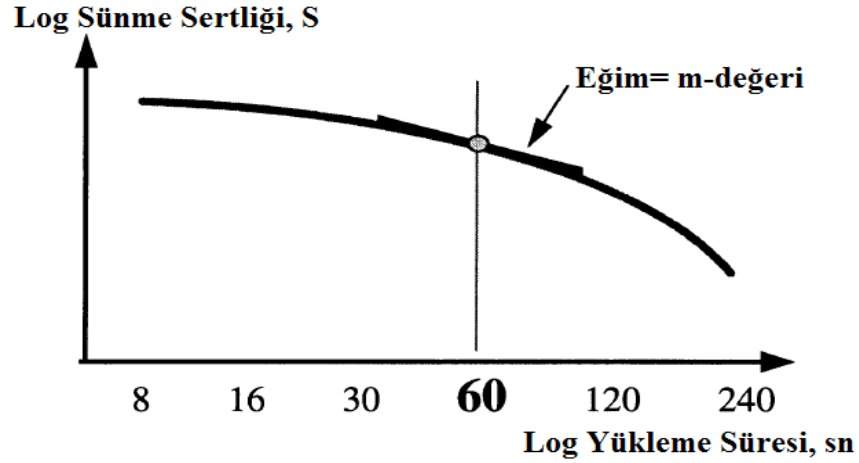
P : Uygulanan sabit yük (N)

L : Mesnetler arası uzaklık (102 mm)

b : Kiriş uzunluğu (12,5 mm)

h : Kiriş kalınlığı (6,25mm)

$\delta_{(t)}$: t anındaki yer değiştirme (mm)



Şekil 3.21 Sünme oranının (m-değer) belirlenmesi grafiği (McGennis et al. 1994).

Deneyin yapıldığı hazineye kullanılacak sıvı sıfırın altındaki sıcaklıklarda donmayacak özellikte olmalıdır (Şekil 3.22). Deney numunesi bu sıvı banyosu içerisinde orta noktasından etkiyen 980 mN sabit yük altında 240 saniye süresince deneye tabi tutularak defleksiyonu hesaplanır. Tabi tutulduğu sıcaklıkta 60. saniyedeki sertlik değeri ($S_{(t)}$) 300 MPa'ın üzerinde, sünme oranının da (m) 0,300 den daha düşük değerde olmamalıdır. Bu değerler bilgisayar yazılımı tarafından gerekli bilgilerin girilmesiyle deney sonunda otomatik olarak hesaplanmaktadır. Sünme rijitliğinin, bitümlü kaplamanın en düşük tasarım sıcaklığında 2 saatlik yükleme sonrasında hesaplanması istenir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki bu değerin, deney sıcaklığı 10 °C arttırıldığında 60 saniye sonundaki sünme rijitliği değerine eşit olacağı belirlenmiştir. Bu nedenle yazılım tarafından 60. saniyedeki rijitlik değeri hesaplanarak verilmektedir (Tunç 2004).



Şekil 3.22 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti.

Deneyin süre olarak daha erken sonlandırılması amacı ile 2 saatte bitirilen deney sonucu parametrelerinin, sıcaklığın 10 °C arttırılarak 60. saniyede elde edilen değerlere eşit olduğu görülmüştür. Bu nedenle numunenin sağladığı minimum sıcaklıktaki kriterlerin 10 °C altında olan değer esas alınarak performans sınıfı belirlenmektedir. Örneğin -12 °C’de şartname kriterlerine uyan numunenin performans dereceli sınıflandırması PG X-22 şeklinde belirlenmektedir.

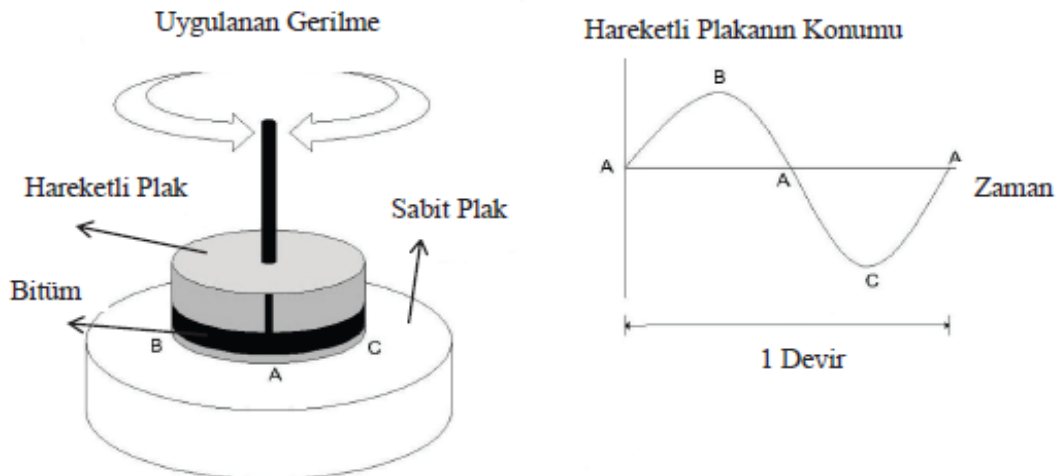
3.2.4.5 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi

Bu deney, bitümlü bağlayıcının orta-yüksek sıcaklıktaki faz açısı (δ) ve kompleks kesme modülünü (G^*) hesaplayarak, viskoz ve elastik davranışı tespit etmek amacıyla yapılmaktadır (Asphalt Institute, 1994). Yüksek sıcaklıkta oluşacak tekerlek izi ve orta dereceli sıcaklıklarda meydana gelebilecek yorulma dayanımını belirlemek için tasarlanmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Dinamik kayma (Kesme) reometresi deney (DSR) aleti.

RTFOT sonrasında elde edilen numuneler bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımını, PAV ile yaşlandırılan numuneler ise yorulmaya karşı dayanımının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Deneyde kullanılacak numunelerin boyutları ise RTFOT ile elde edilenler için çapı 25 mm, kalınlığı ise 1mm; PAV ile yaşlandırılmış numuneler için ise çapı 8 mm, kalınlığı da 2 mm olan numuneler kullanılmaktadır (Ahmedzade vd. 2008).

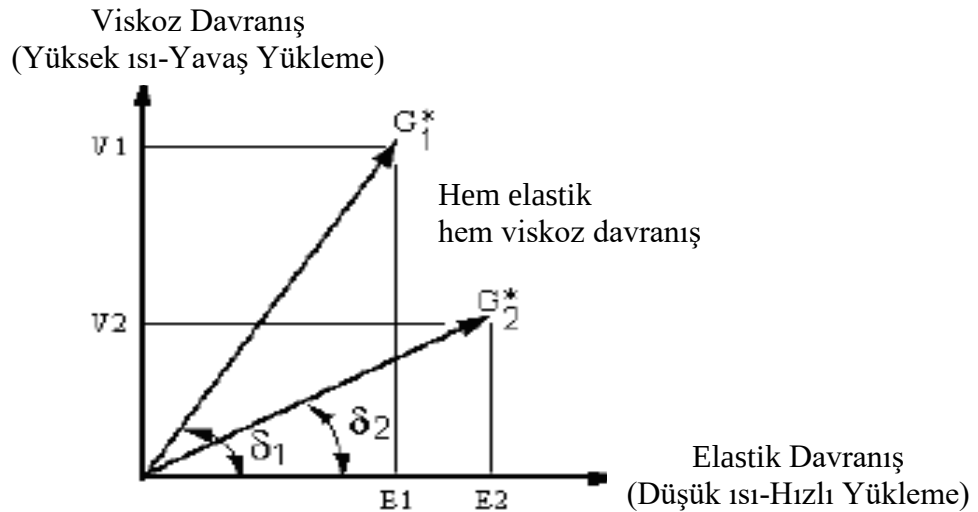


Şekil 3.24 DSR deneyi işleyişi (Zaniewski and Pumphrey 2004).

Deney aleti üzerinde, altta sabit, üstte ise numuneye kuvvet uygulayan hareketli plakalar bulunmaktadır. İkisi arasındaki numune belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılarak,

belli bir hız ile deney süresi boyunca döndürülür. Dönüş hareketi önce A noktasından B noktasına, sonra ters yönde C noktasına kadar devam eder. C'den tekrar A noktasına ulaştığında ise 1 devri tamamlamış olur (Şekil 3.24). Söz konusu bir devirlik bu hareketin hızına ise frekans denir. Frekansın ölçüsü ise 10 rad/sn.'dir. (1 rad.= 57,2958°). Bu değer de yaklaşık 1,59 Hz (dev/sn)'e eşittir (Tunç 2004). Frekansın 10 rad/sn alınmasının nedeni, 100 km/h'lik trafik hızının bu değere denk geldiğinin kabul edilmesidir. Trafik hızının 50 km/h ve daha yavaş olduğu şehir içindeki yollar için 5 rad/sn, durağan trafik için ise 1 rad/sn alınmaktadır (Kennedy et al. 1994).

Bitümlü kaplamalar, ortalama sıcaklık ve trafik yükleri altında elastik ve viskoz davranışları aynı anda gösterebilmektedir. Kaplamaların viskoelastik özelliklerinin birbirlerinden farklı olması nedeniyle, trafik yükleri etkisi altında bu davranış parametreleri de farklılıklar gösterecektir. $\tau = \delta \times G$ bağıntısındaki kayma gerilmesinin (τ) hesaplanabilmesi için kayma modülü (G) ve kayma deformasyonunun (δ) bilinmesi gerekmektedir. DSR deneyinde bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülüyle (G^*) faz açısı (δ) hesaplanarak, numunenin viskoz ya da elastik davranışlardan hangisini sergilediği belirlenmektedir. Kompleks kayma modülü (G^*) numunenin tekrar eden gerilmelerin yaratacağı deformasyonlara karşı sergilediği direnci ifade etmektedir. G^* ve δ değerleri sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 3.25 Viskoelastik davranış gafiği (Tunç 2004).

Faz açısı (δ) arttıkça, viskozite özelliği artarken, faz açısının azalmasıyla ise elastik davranış daha fazla görülmektedir. 2 numaralı numunenin faz açısı (δ) değeri düşüktür, dolayısıyla elastik bileşen faktörünün büyük olması nedeniyle yük etkisinin

kalkmasından sonra deformasyonun büyük bir kısmı geri dönecektir. 1 numaralı numunenin ise elastikiyet özelliği daha az olduğundan deformasyonun kalıcılığı da daha fazla olacaktır. Kompleks kayma modülü (G^*) değeri, tam olarak numunenin davranış özelliklerini belirlemede yetersizdir. Faz açısı (δ) ile birlikte değerlendirildiği takdirde viskoelastik davranış daha net belirlenebilmektedir (Şekil 3.25). G^* değerinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (Tunç 2004).

$$G^* = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki bağıntıda yer alan kayma deformasyonu (γ) ve kayma gerilme (τ) değerleri DSR deneyinin yapıldığı yazılım yardımıyla aşağıdaki parametre ve bağıntılar kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau = (2T) / \pi r^3 \quad (3.5)$$

$$\gamma = \Theta r / h \quad (3.6)$$

Buradaki parametreler;

τ : Kayma gerilmesi (Pa),

γ : Kayma deformasyonu (%),

T: Uygulanan Tork (Nm),

r: Numunenin yarıçapı (12,5 - 4 mm),

θ : Dönme açısı (radyan),

h: Numunenin yüksekliği (1-2 mm), ile gösterilmektedir (Kennedy et al. 1994).

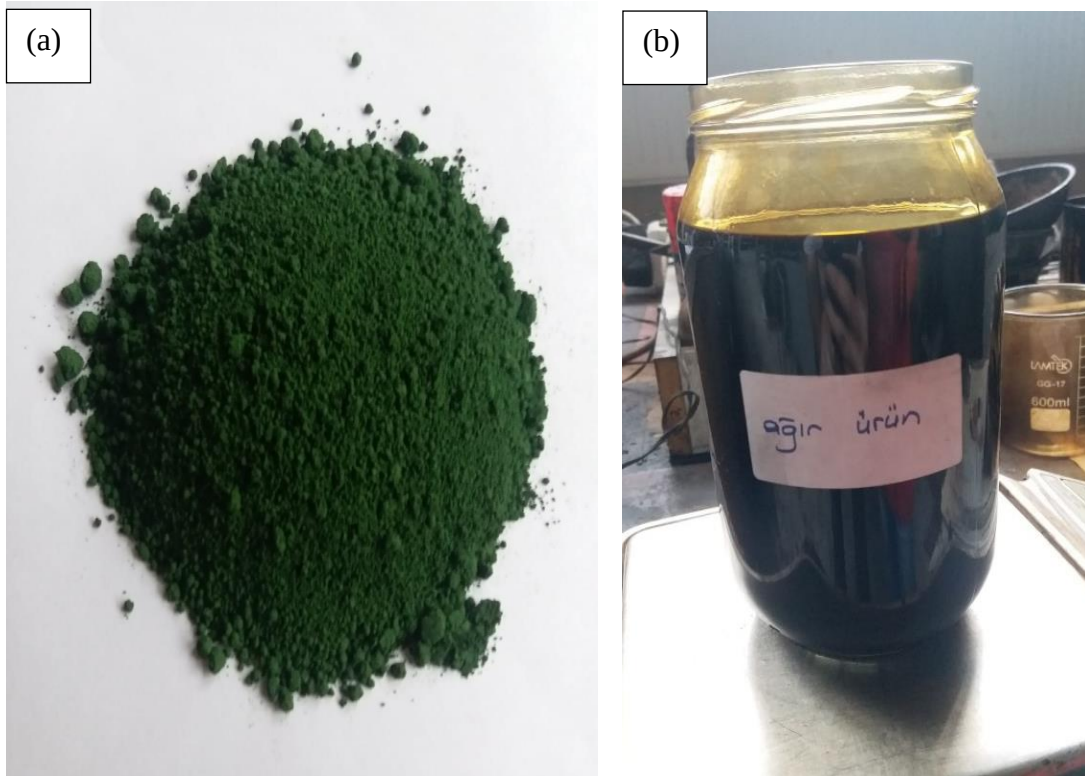
Faz açısı (δ) ve kompleks kayma modülü (G^*) değerleri kullanılarak performans esaslı bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesi mümkündür. $G^*/\sin\delta$ değerinin 1,00 kPa ve daha yüksek olması saf bağlayıcılar için, 2,20 kPa ve daha yüksek olması RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için, 5.000 kPa ve daha düşük değerde olması şartı ise PAV ile yaşlandırılmış numuneler için, KGM 2013 şartnamesindeki sınır değerlerdir (Tunç 2004).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Deneyel Çalışmalarda Kullanılacak Numunelerin Hazırlanması

Yapılan bu çalışma kapsamında, saf bitümlü bağlayıcı ile Ağır Lastik Yağı ve Nanokromoksit katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerine iki grup deney yapılmıştır.

Deneyel çalışmada kullanılan saf bitümlü bağlayıcı, Erzurum Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'ne ait laboratuvardan temin edilen, 70/100 penetrasyonlu Batman bitümüdür. Deneyde kullanılmak üzere, bitüm ağırlığına oranları %1, %2 ve %3 olan piroliz yöntemiyle elde edilen Ağır Lastik Yağı ve Nanokromoksit içeren farklı karışımlar hazırlanıp, deney sonuçları saf bitümlü bağlayıcı değerleri ile karşılaştırılarak, modifiye uygulamasının bitümün performansındaki etkileri incelenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 (a) Deneyde kullanılan nanokromoksit ve (b) ağır lastik yağı.



Şekil 4.2 Deney numunelerin hazırlanışı.

Deneyde kullanılmak üzere hazırlanan 400'er gramlık 3 farklı numuneye %1+%1 oran için 4'er gram ALY ve NKO, %2+%2 oran için 8'er gram ALY ve NKO, %3+%3 oran için de 12'şer gram ALY ve NKO eklenip, yüksek devirli karıştırıcı kullanılarak 150 °C sıcaklıkta, 5.000 d/d karıştırma hızında 30 dakika boyunca karıştırılarak hazırlanmıştır (Şekil 4.2).

Çalışmada, RTFOT ile yaşlandırılan numuneler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi iktisadi teşekkülü olan İSFALT laboratuvarına gönderilerek, PAV deneyine tabi tutulmuş, diğer tüm deneyler ise Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ulaştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları

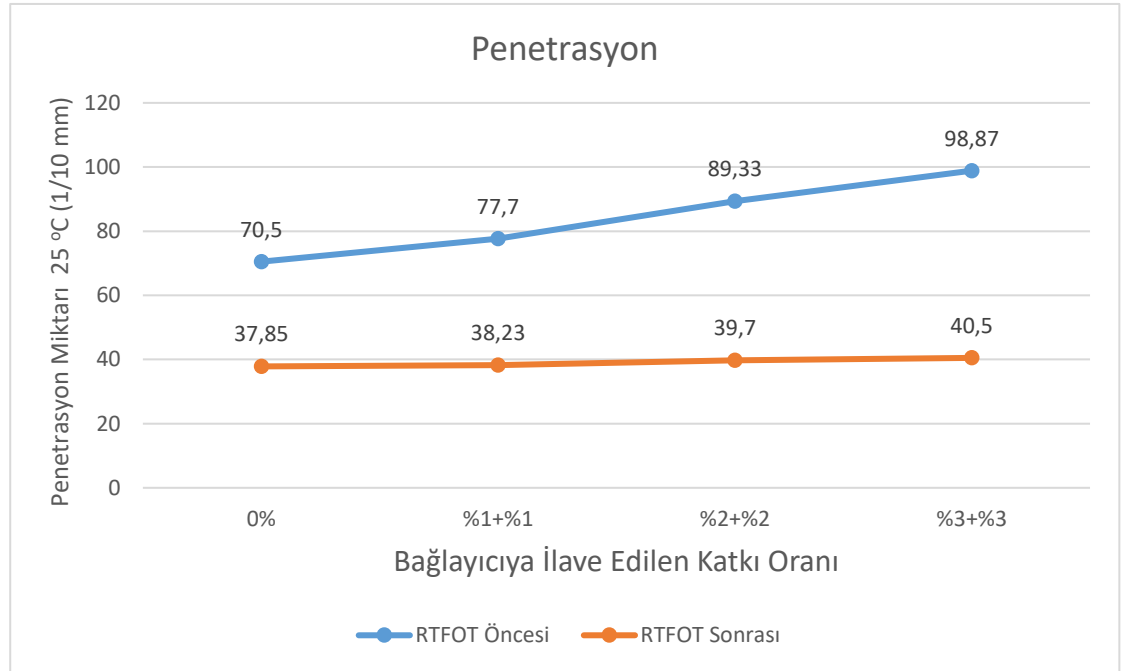
Bu deneyin titizlikle yapılması, çıkacak sonucun doğruluk derecesinin yüksek olabilmesi açısından önemlidir (Şekil 4.4). Numune sıcaklığının en önemli kriterlerden biri olması nedeniyle, deneye tabi tutulacak numuneler 2 saatlik serbest soğumadan

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

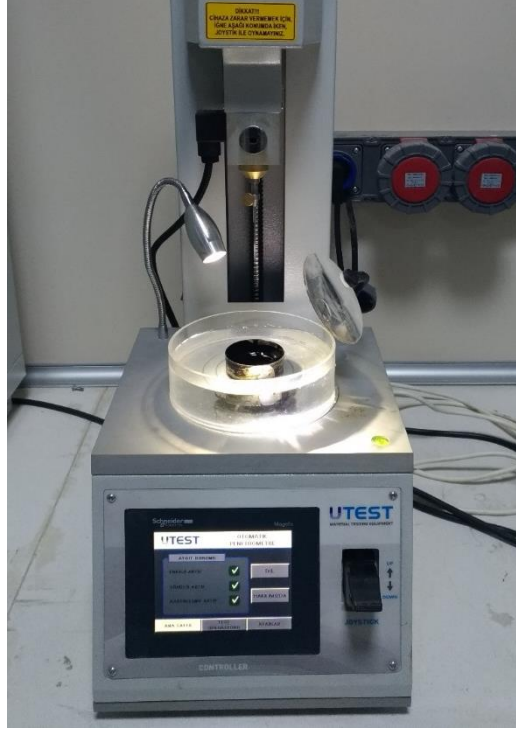
sonra en az 1 saat boyunca 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilerek, yine aynı derecedeki su deney kabına boşaltılıp, numune içerisinde iken, 2 dakika içerisinde 3 farklı noktadan uygulama yapıp ortalamaları alındıktan sonra bulunan penetrasyon değerleri aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Penetrasyon deney sonuçları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0	%1 + %1	%2 + %2	%3 + %3
Penetrasyon Değerleri (1/10 mm.) (RTFOT Öncesi)	70,50	77,70	89,33	98,87
Penetrasyon Değerleri (1/10 mm.) (RTFOT Sonrası)	37,85	38,23	39,70	40,50



Şekil 4.3 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının penetrasyon değerlerinin değişimi.



Şekil 4.4 Penetrasyon deneyi yapılışı.

70/100 penetrasyona sahip saf bağlayıcıya, ağırlık oranınca %1+%1, %2+%2 ve %3+%3 NKO ve ALY ilave edildikten sonra yapılan deney sonuçlarına göre, katkı malzemelerinin saf bağlayıcının penetrasyon değerini yaşlanmadan önce sırasıyla %1, %4,88 ve %7 oranında artırdığı, yaşlanmadan sonra ise yine sırasıyla %10,2 , %26,71 ve %40,2 oranında arttırdıkları görülmüştür (Şekil 4.3). Bu değerlerin artması, bağlayıcının daha yumuşak hale geldiği ve esnekliğinin artmasının yanı sıra, işleme sırasında kolaylık sağlayacağı, sıcaklığın düşük olduğu hallerde de kırılma ve çatlamları azaltacağı sonucuna ulaştıracaktır.

4.3 Parlama Noktası Deneyi (Cleveland Açık Kap Metodu) Sonuçları

Cleveland Açık Kap Metodu ile yapılan Parlama noktası deneyi genellikle 79 °C üzerindeki parlama noktasına sahip, özellikle içerisinde katbek yağlarının ve yanıcı gazların bulunduğu katran ve asfalt gibi petrol türevi ürünler için uygulanır (Şekil 4.5). Bu değerlerin tespiti bitümlü sıcak karışımların üretim ve uygulaması esnasında tehlikeli durumların oluşmaması için, uygun sıcaklık koşullarının tespit edilmesinde kullanılır (İsfalt 2001).

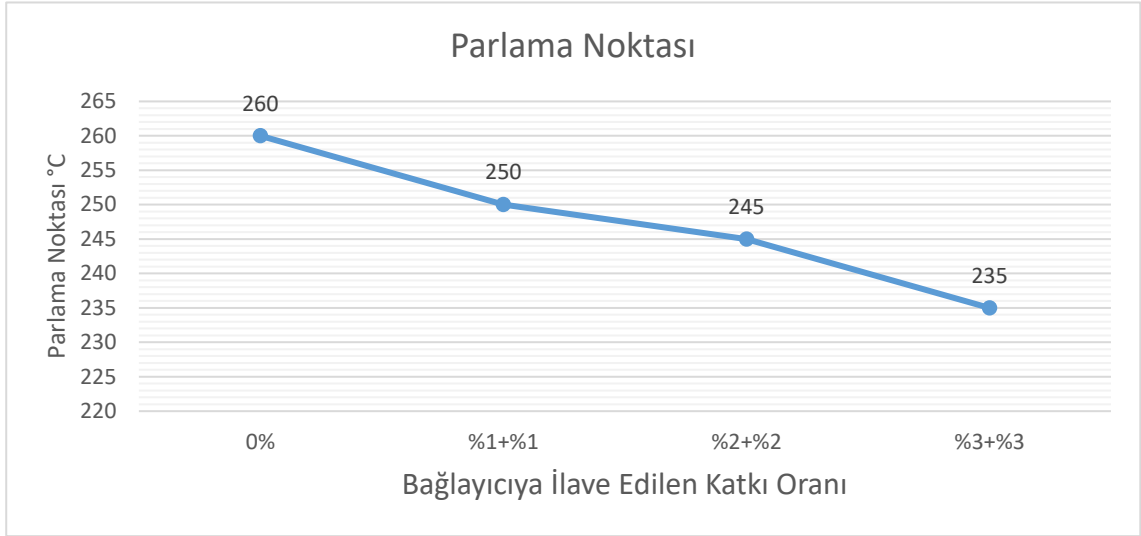


Şekil 4.5 Parlama noktası deneyi yapılışı.

Deney aleti üzerindeki ve sürekli yanar halde bulundurulmuş alev çubuğu, numune üzerinden 1 saniyede geçecek şekilde gezdirilerek, sürekli bir tutuşma olmadan, parlama meydana geldiği andaki sıcaklık termometreden okunarak parlama noktası belirlenmiştir. 2 ayrı numune için, ortalamaları alınarak kaydedilen sıcaklık değerleri Çizelge 4.2’de ve grafik olarak da Şekil 4.6’da verilmektedir.

Çizelge 4.2 Parlama noktası deney sonuçları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0	%1 + %1	%2 + %2	%3 + %3
Şartname Sınırı (°C)	≥ 220			
Parlama Noktası (°C)	260	250	245	235



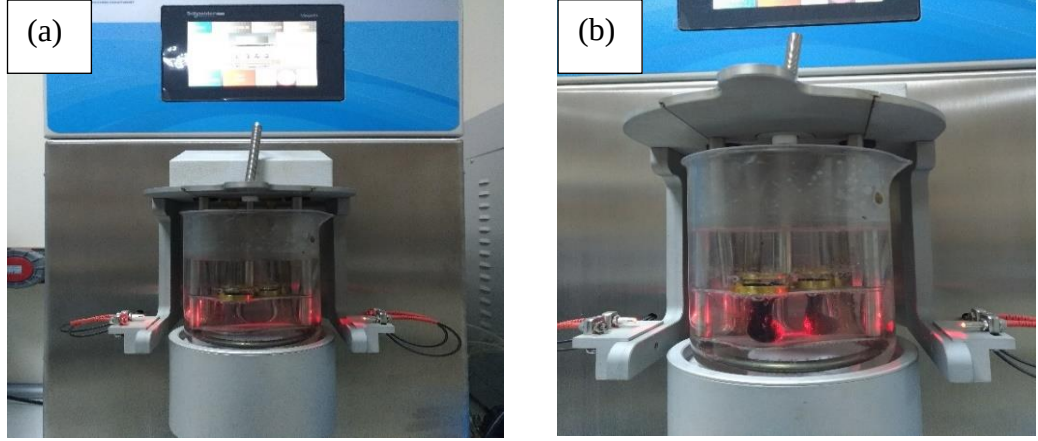
Şekil 4.6 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının parlama noktası değerlerinin değişimi.

Elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde, katkılı numunelerin saf bağlayıcıya nazaran parlama noktası değerini düşürdüğü, ancak yine de şartname sınırı olan 220 °C'nin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

4.4 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Deneyde, 80 °C ve üzerindeki yumuşama noktasına sahip bitümler için gliserin, 80 °C altındakiler için ise su banyosu kullanılır. Yapılan deneyde su banyosu kullanılmıştır. Deney kabındaki suyun sıcaklığı deney aleti tarafından dakikada 5 °C artacak şekilde otomatik olarak ayarlanmaktadır. Pirinçten yapılmış 2 adet halka içerisine ısıtılarak akışkan hale getirilen bitüm numuneleri taşmayacak şekilde dökülerek düzeltildikten sonra, oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Soğuduktan sonra, su sıcaklığı 5 °C olan deney kabına koyularak burada da 15 dakika bekletildi.

Ağırlığı 3,50 gr çapı 9,50 mm olan çelikten yapılmış bilyeler halkaların içine koyularak ısıtılmaya başlandı. Bilyelerin sıcaklıklarının da 5 °C olması deneyden daha doğru sonuç alınmasını sağlayacağından, bilyeler 5 °C ayarlanmış soğutucuda bekletildi. Isıtılan numuneler, bilyelerin ağırlığıyla deforme olarak 2,5 cm altında bulunan plakaya temas ettiği anındaki sıcaklıklar kaydedildi. İki numunenin temas ettiği andaki sıcaklıkların ortalaması alınarak yumuşama noktası değeri tespit edilmiş oldu (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Yumuşama noktası deneyi yapılışı (a),(b).

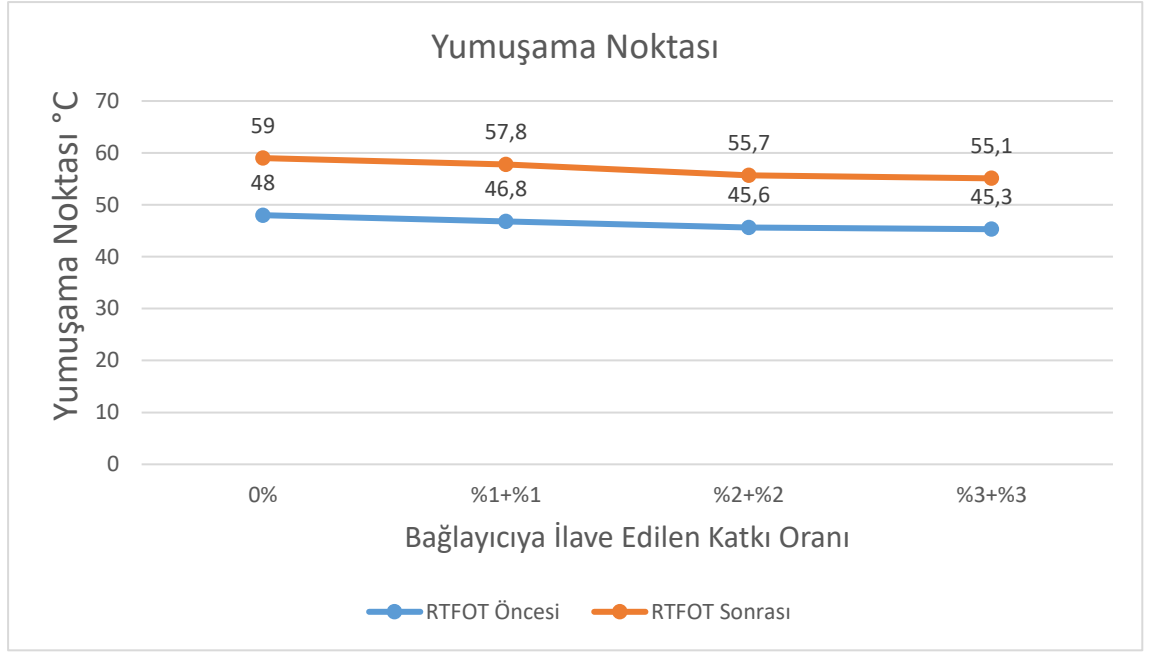
İki numunenin yumuşama noktası sıcaklığı arasındaki fark 1°C den daha fazla olmadığı için deney tekrardan yapılmadan tamamlandı. 2 ayrı numune için, ortalamaları alınarak kaydedilen sıcaklık değerleri Çizelge 4.3'te ve grafik olarak da Şekil 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.3 Yumuşama noktası deney sonuçları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0	%1 + %1	%2 + %2	%3 + %3
RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası (°C)	48	46,8	45,6	45,3
RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	59	57,8	55,7	55,1

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarını belirlemek için yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinin kullanılmasıyla bulunan indekse Penetrasyon İndeksi (PI) denilir. Bu değerın hesaplanabilmesi için, bitümün 25 °C'deki penetrasyon değeri (Pen₂₅) ve yumuşama noktası değeri (YN) kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır. Isıya karşı duyarlılık attıkça PI değeri -2 den düşük, ısıya karşı duyarlılık azaldıkça ise PI değeri +2 den daha büyük çıkmaktadır (Read and Whiteoak 2003).

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

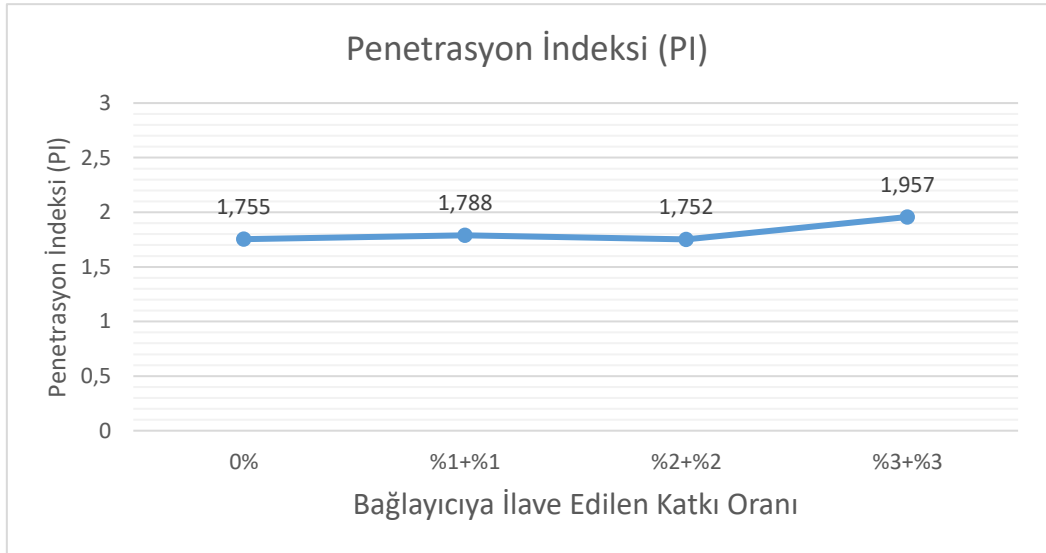


Şekil 4.8 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının parlama noktası değerlerinin değişimi.

Elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde, katkılı numunelerin RTFOT ile yaşlandırmadan önce sırasıyla %2,50 , %5 ve %5,62 oranında düşürdüğü, RTFOT ile yaşlandırdıktan sonra ise yumuşama noktası değerini katkı oranının artışı ile birlikte sırasıyla %2,03 , %5,6 ve %6,61 oranında düşürdüğü görülmüştür. Elde edilen değerler şartname sınırları içerisinde kalmıştır. PI bağıntısında değerler yerine yazıldığında çıkan sonuçlar ise Çizelge 4.4'te ve grafik olarak da Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre katkılı bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığı azalttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 Penetrasyon indeksi sonuçları.

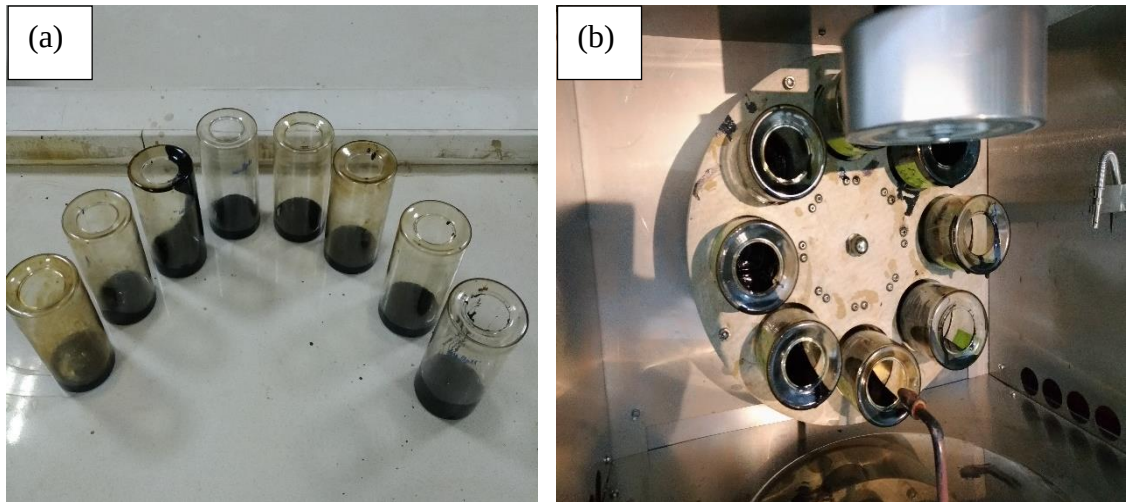
Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0	%1 + %1	%2 + %2	%3 + %3
Penetrasyon Değerleri (1/10 mm.)	70,50	77,70	89,33	98,87
Yumuşama Noktası (°C)	59	57,8	55,7	55,1
Penetrasyon İndeksi (PI)	1,755	1,788	1,752	1,957



Şekil 4.9 Saf bitümlü bağlayıcı ve modifiye edilmiş bağlayıcının PI değerlerinin değişimi.

4.5 Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi Sonuçları

Bu işlem deneysel olmasının yanı sıra, bitümlü bağlayıcının karıştırma ve serim aşamasındaki kısa dönem yaşlanmasını temsilen ve bitümün özelliklerinin araştırılacağı diğer deneylerde kullanılmak üzere yaşlandırılmış numunelerin kullanılabilmesini sağlamaktır. Deney sonucunda ise elde edilen yaşlanmış numunelerin kütle kayıpları hesaplanarak, şartname sınırları içerisinde kalıp kalmadığı belirlenmektedir.



Şekil 4.10 (a) RTFOT numuneleri ve (b) deneyin yapılışı.

Bu deneyde bitümlü bağlayıcının karışım sırasındaki sertleşmesini temsilen, hava ve ısıнын birlikte etki ettiği hallerdeki davranışı değerlendirilir. Oluşan kütle kaybı belirlenerek, fiziki özelliklerinin değişimini inceleyebilmek için gerekli olan numuneler elde edilmektedir. Deneyde aynı özellikteki silindirik sekiz cam şişe kullanılarak, sıcaklık 163 °C'ye ulaştığında deney başlatılır (Şekil 4.10).

Deney yapılırken, tüm şişelerin içerisine 35 gr bitümlü bağlayıcıyı eklenerek 163 °C'deki deney aleti içerisine yerleştirildi. Deney aletine yerleştirilen numuneler dikey ekseninde 15 dev/dk. hızda dönerken içerisine basınçlı hava verilerek 85 dk. boyunca yaşlanmaya tabi tutuldu. Dönüş sırasında deney aleti içerisindeki hava üfleyiciyle şişelerin içerisine, akış hızı 4.000 ± 200 ml/dk. olacak biçimde basınçlı hava üflemeaktadır. Sıcaklık etkisi altındaki bitüm, şişelerin iç yüzeyini tamamıyla kaplayacak şekilde ince bir film tabakasının oluşmasını sağlamaktadır. Bu şekilde yaşlanma olayı daha da kolay hale gelmektedir. Deney sonlandığında numunelerden ikisi kütle kaybının belirlenebilmesi amacıyla, diğer altı numune ise bitümlü malzemenin yaşlandırmadan sonra incelenecek fiziksel özelliklerinin tespiti amacıyla muhafaza altına alındı. Kütle kaybının hesaplanmasında ise aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanan kütle kayıpları, Çizelge 4.5'te verilmektedir. Formüldeki M_1 yaşlanma öncesi kütleyi, M_2 ise yaşlanma sonrasındaki kütleyi ifade etmektedir.

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] * 100 \quad (4.2)$$

Çizelge 4.5 Bağlayıcıların RTFOT ile yaşlandırma sonrası kütle kayıp oranları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0		%1+%1		%2+%2		%3+%3	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
İlk Kütle (gr)	35,0	35,2	35,1	35,2	35,3	35,2	35,4	35,3
Son Kütle (gr)	34,9	35,1	35,0	35,1	35,1	35,1	35,0	35,0
Kütle Kaybı (%)	0,286	0,284	0,285	0,284	0,567	0,284	1,130	0,850
Şartname Sınırı (%)	$\leq 1,000$							
Ortalama (%)	0,285		0,285		0,426		0,990	

Deney tüplerinin boş ağırlıkları alınıp, tartı sıfırlandıktan sonraki değerler kaydedilmiştir. Deney sonrasında da, toplam ağırlıktan boş şişe ağırlıkları çıkarılarak son kütle bulunmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, elde edilen değerlerin şartname sınırı olan maksimum %1'in altında kaldığı görülmektedir.

4.6 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların uzun dönem yaşlandırılmasını sağlamak amacı ile yapılan bu deney, kaplamanın hizmet ömrü süresince karşılaşacağı etkilere karşı gösterdiği davranışı belirleyebilmek amacıyla yapılmaktadır (Tunç 2004).

Deneyde, RTFOT ile yaşlandırılmış 50 gram ağırlığındaki numuneler ısıtılarak akışkan hale getirildikten sonra, 12,5 cm. çapındaki çelikten imal edilmiş deney kaplarına boşaltılarak raflara yerleştirilir. Kapalı kaptaki 20 saat süresince 2.070 kPa. yüksek basınç altında, 90 ila 110 °C sıcaklıkta yaşlandırılması sağlanır. Sıcaklık seviyesi kullanılan bitümlü bağlayıcının cinsine göre değişiklik göstermektedir. Deney yapıldıktan sonra elde edilen yaşlanmış numuneler BBR, DSR ve DTT deneylerinde kullanılmak üzere muhafaza altına alınır (Tunç 2004).

Bu çalışma kapsamında, önce RTFOT ile yaşlandırılan numuneler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi iktisadi teşekkülü olan İSFALT laboratuvarına gönderilerek, PAV deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonrası geri alınan numuneler BBR deneyi için kullanılmak üzere muhafazaya alınmıştır.

4.7 Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

Bu deney, bitümlü bağlayıcının orta-yüksek sıcaklıktaki faz açısı (δ) ve kompleks kesme modülünü (G^*) hesaplayarak, viskoz ve elastik davranışı tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta oluşacak tekerlek izi ve orta dereceli sıcaklıklarda meydana gelebilecek yorulma dayanımını belirlemek için tasarlanmıştır (Şekil 4.11).

RTFOT ile elde edilen numuneler bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımını, PAV ile yaşlandırılan numuneler ise yorulmaya karşı dayanımının hesaplanmasında

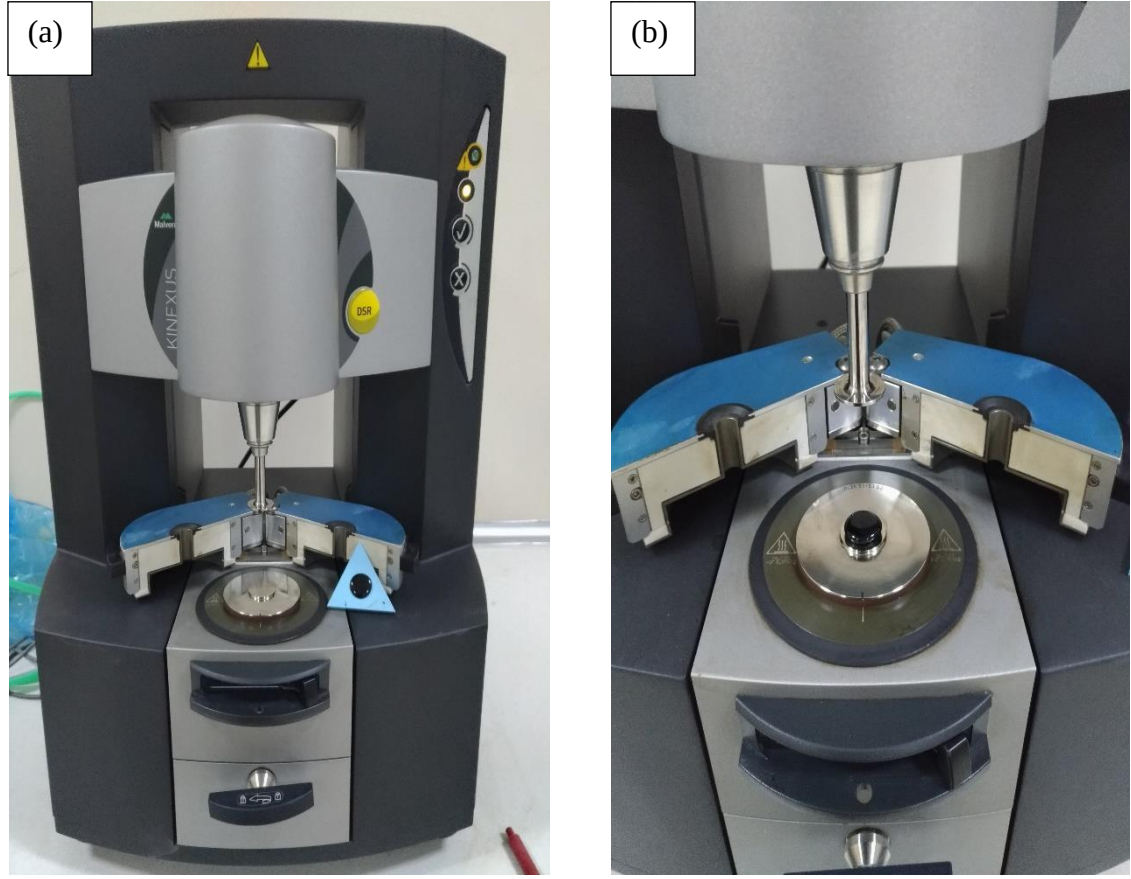
kullanılmaktadır. Deneyde kullanılacak numunelerin boyutları ise RTFOT ile elde edilenler için çapı 25 mm, kalınlığı ise 1 mm; PAV ile yaşlandırılmış numuneler için ise çapı 8 mm, kalınlığı da 2 mm olan numuneler kullanılmaktadır (Ahmedzade vd. 2008).

Faz açısı (δ) ve kompleks kayma modülü (G^*) değerleri kullanılarak performans esaslı bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin belirlenmesi mümkündür. $G^*/\sin\delta$ değerinin 1,00 kPa ve daha yüksek olması saf bağlayıcılar için, 2,20 kPa ve daha yüksek olması RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için, 5.000 kPa ve daha düşük değerde olması şartı ise PAV ile yaşlandırılmış numuneler için, şartnamedeki sınır değerlerdir (Tunç 2004).

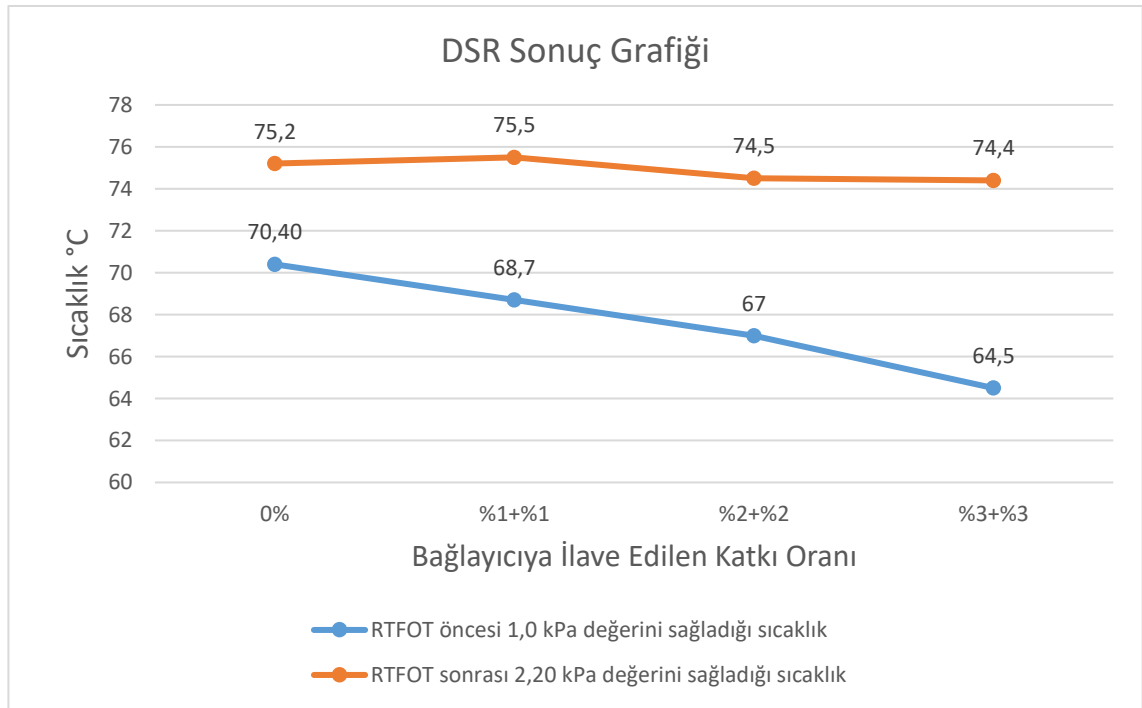
Faz açısı (δ) arttıkça, viskozite özelliği artarken, faz açısının azalmasıyla ise elastik davranış daha fazla görülmektedir. Kompleks kayma modülü (G^*) değeri, tam olarak numunenin davranış özelliklerini belirlemede yetersizdir. Faz açısı (δ) ile birlikte değerlendirildiği takdirde viskoelastik davranış daha net belirlenebilmektedir (Tunç 2004). 70/100 penetrasyona sahip saf bağlayıcı ile yapılan deney sonrasında, yaşlandırılmamış numuneler ile RTFOT ile yaşlandırılan numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiş, Şekil 4.12'de ise grafiksel olarak gösterilmiştir. Deney numuneleri akışkan hale gelinceye kadar etüvde ısıtılarak, özel silikon kalıplara doldurulduktan sonra oda sıcaklığında 30 dakika serbest soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler sırayla deney aletine yerleştirildikten sonra ünite kapatılıp, bilgisayar destekli deney aletine başlangıç sıcaklığı 58 °C girilerek deney gerçekleştirilmiştir. Deney aleti, girilen sıcaklığa kadar numuneyi ısıttıktan sonra deneye başlamaktadır. Bilgisayar yazılımı şartname sınırlarının sağlandığı sıcaklık değerini, deney sonunda otomatik olarak hesaplayarak vermektedir. Aynı işlemler RTFOT ile yaşlandırılan numuneler için deney başlığı ve alt plaka değiştirilerek tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.6 Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önceki ve RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonraki G^* ve $\sin \delta$ değerleri.

Bağlayıcı Türü		Sıcaklık (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*/\sin \delta$ (kPa)	Sağladığı Sıcaklık (°C)	Sınır Değer (kPa)	PG Sınıfı
SAF	Orijinal	58	4,32	77,81	4,42	70,40	$\geq 1,00$	PG 70-Y
		64	1,95	80,80	1,97			
		70	1,02	82,94	1,02			
		76	0,49	84,81	0,49			
	RTFOT sonrası	58	17,20	67,30	18,65	75,20	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,81	71,53	8,23			
		70	3,91	75,20	4,04			
		76	1,88	78,75	1,92			
%1 ALY + %1 NKO	Orijinal	58	3,80	78,18	3,89	68,70	$\geq 1,00$	PG 64-Y
		64	1,73	81,26	1,75			
		70	0,82	83,74	0,82			
	RTFOT Sonrası	58	16,95	66,37	18,50	75,50	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,53	70,95	7,96			
		70	3,94	74,53	4,09			
		76	2,02	77,93	2,07			
	RTFOT Sonrası	58	16,36	67,06	17,77	74,50	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,17	71,67	7,56			
		70	3,52	75,51	3,63			
		76	1,79	78,83	1,82			
%2 ALY + %2 NKO	Orijinal	58	3,50	78,31	3,58	67,00	$\geq 1,00$	PG 64-Y
		64	1,38	81,78	1,40			
		70	0,67	84,05	0,68			
	RTFOT Sonrası	58	16,36	67,06	17,77	74,50	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,17	71,67	7,56			
		70	3,52	75,51	3,63			
		76	1,79	78,83	1,82			
	RTFOT Sonrası	58	17,53	67,13	19,03	74,40	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,03	72,10	7,39			
		70	3,51	75,76	3,63			
		76	1,77	79,03	1,80			
%3 ALY + %3 NKO	Orijinal	58	2,20	79,50	2,24	64,50	$\geq 1,00$	PG 64-Y
		64	1,03	82,15	1,04			
		70	0,55	83,97	0,551			
	RTFOT Sonrası	58	17,53	67,13	19,03	74,40	$\geq 2,20$	PG 70-Y
		64	7,03	72,10	7,39			
		70	3,51	75,76	3,63			
		76	1,77	79,03	1,80			



Şekil 4.11 DSR deneyinin yapılışı (a), (b).



Şekil 4.12 Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önceki ve RTFOT ile yaşlandırıldıktan Sonraki $G^*/\sin\delta$ sınır değerlerinin sağlandığı sıcaklık grafiği.

Deney sonuçlarına göre, yaşlandırılmadan önce deneye tabi tutulan numunelerden sadece saf bağlayıcının PG 70-Y sınıfı için şartname değerini sağladığı, katkılı numunelerin ise tamamının PG 64-Y sınıfı için şartname değerini sağladıkları görülmüştür. RTFOT ile yaşlandırılan numunelerden ise hem saf hem de katkılı bağlayıcıların tamamının PG 70-Y sınıfı için şartname değerini sağladıkları görülmüştür.

Deney sonuçları incelendiğinde, RTFOT ile yaşlandırmadan önce katkısız bağlayıcıya göre, katkı oranı artırıldıkça, tekerlek izi dayanımının önce bir miktar artıp sonra ise düşeceği görülmektedir. RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra ise G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerinin azalıp, faz açısının ise (δ) arttığı ve tekerlek izi dayanımında sürekli bir düşüş olduğu görülmektedir. Ancak yüksek sıcaklıkta, katkı oranı arttıkça faz açısının da arttığı, yani malzemenin daha viskoz davranacağı söylenebilir.

Şekil 4.12'deki grafikte, saf bağlayıcının yaşlandırıldıktan sonra sıcaklık dayanımındaki artış oranı %6,818 iken, %1+%1 katkı oranındaki bağlayıcı için %9,898; %2+%2 katkı oranındaki bağlayıcı için %11,194; %3+%3 katkı oranındaki bağlayıcı için %15,348 oranında artışın olduğu görülmektedir. Bu da, yaşlanma sonrasında, bağlayıcıdaki katkı oranı arttıkça, katkısız bağlayıcıya nazaran daha olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Yani yaşlanma etkisinin azaldığı, katkı olarak kullanılan ALY ve NKO'nun bitümlü bağlayıcıyı gençleştireceği söylenebilir.

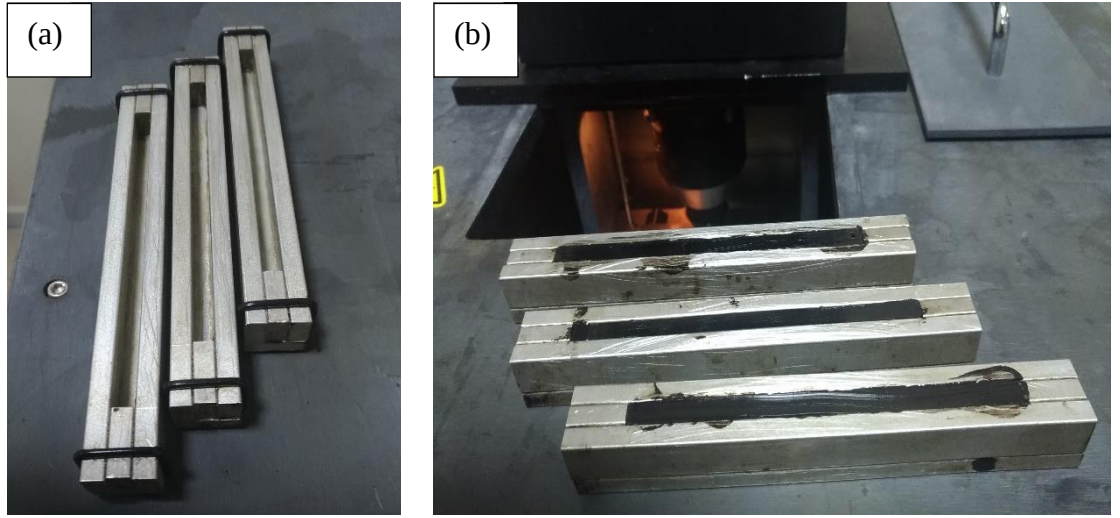
İklim şartlarının daha sert, sıcaklığın düşük olduğu ve trafiğin hızlı hareket ettiği hallerde, asfalt kaplaması elastik katılar gibi davranarak, büzülme çatlaklarına ve kırılmalara maruz kalabilir. Bu deneyde kullanılan bitümlü bağlayıcının içerisindeki katkı oranı %3'e kadar arttıkça, büzülmeye bağlı oluşan gerilmeler nedeniyle meydana gelebilecek bu tür bozulmaların azaltılmasını sağlayacağı belirlenmiştir.

4.8 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları

Deneyin yapıldığı hazine kullanılabilecek sıvı sıfırın altındaki sıcaklıklarda donmayacak özellikte olmalıdır. Bu çalışmada sıvı banyosunda metanol kullanılmıştır. Deney numunesi bu sıvı banyosu içerisinde orta noktasından etkiyen 980 mN sabit yük altında 240 saniye süresince deneye tabi tutularak defleksiyonu hesaplanır (Şekil 4.13).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tabi tutulduğu sıcaklıkta 60. saniyedeki sertlik değeri ($S_{(t)}$) 300 MPa'ın üzerinde, sünme oranının da (m) 0,300 den daha düşük değerde olmamalıdır. Bu değerler bilgisayar yazılımı tarafından gerekli bilgilerin girilmesiyle deney sonunda otomatik olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4.14). Sünme rijitliğinin, bitümlü kaplamanın en düşük tasarım sıcaklığında 2 saatlik yükleme sonrasında hesaplanması istenir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu değer, deney sıcaklığı 10 °C arttırıldığında, 60. saniye sonundaki sünme rijitliği değerine eşit olacağı belirlenmiştir. Bu nedenle, yazılım tarafından 60. saniyedeki rijitlik değeri hesaplanarak verilmektedir.



Şekil 4.13 BBR Deney numunelerinin hazırlanması (a), (b).



Şekil 4.14 BBR deneyinin yapılışı.

Yapılan deney sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmektedir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklığın düşmesi ile sünme sertliğinin arttığı ve

dolayısıyla bağlayıcının daha kırılğan bir hal aldığı görülmektedir. %3 ALY+%3 NKO katkılı numunenin saf bağlayıcıya göre PG sınıfını -28'den -34'e düşürdüğü, diğer katkı oranındaki numunelerin ise saf bağlayıcıya göre PG sınıfını değiştirmedeği görülmektedir.

Çizelge 4.7 Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR) sonuçları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranı	Deney Sıcaklığı (°C)								PG Sınıfı
	-6		-12		-18		-24		
	Sünme Sertliği (MPa)	m Değeri	Sünme Sertliği (MPa)	m Değeri	Sünme Sertliği (MPa)	m Değeri	Sünme Sertliği (MPa)	m Değeri	
%0	16,87	0,240	43,46	0,265	161,29	0,325	-	-	X-28
%1+%1	43,65	0,286	91,40	0,296	287,00	0,310	-	-	X-28
%2+%2	17,97	0,293	46,56	0,295	69,95	0,307	-	-	X-28
%3+%3	4,86	0,068	39,62	0,206	63,20	0,283	95,82	0,303	X-34

4.9 Bitümlü Bağlayıcıların PG Sınıflarının Belirlenmesi

Üstün performanslı asfalt kaplama (Superpave) yönteminin amacı, kaplamaların yüksek ve düşük sıcaklıklarda gösterecekleri performans seviyelerine göre sınıflandırmak ve bu sınıflara göre kullanım amacına uygun seçim yapılmasını sağlamaktır. Bu tür bağlayıcılar, Performans Sınıfı bitüm olarak nitelendirilip “PG” simgesi kullanılarak sınıflandırılırlar. Bitümün sınıflandırılabilmesi için uygulanan deneylerde, bitümlü bağlayıcıdan istenilen davranış aynı olup bu davranışın gösterildiği sıcaklık değerleri farklı olmaktadır. Bu da, PG sınıfına sahip bitümlü bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin aynı kalacağı, bu özelliklerin sergileneceği sıcaklık değerlerinin ise malzemenin kullanılmak istenilen bölgedeki iklime ve hava şartlarına göre farklılıklar göstereceği anlamına gelir (Öztürk ve Çubuk 2004).

Yapılan bu çalışmada, yaşlandırılmamış katkısız bitümlü bağlayıcı Performans Sınıfı PG7 0-Y, %1 ALY+%1 NKO, %2 ALY+%2 NKO ve %3 ALY+%3 NKO içeren modifiye bitümlü bağlayıcıların ise PG 64-Y olarak bulunmuştur. RTFOT yöntemi ile yaşlandırıldıktan sonra ise, katkısız bitümlü bağlayıcı ile %1ALY+%1NKO ve %2 ALY+%2 NKO içeren modifiye bitümlü bağlayıcıların sınıfı PG 70-28, %3 ALY+%3 NKO içeren modifiye bitümlü bağlayıcının sınıfı ise PG 70-34 olarak belirlenmişlerdir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Düşük sıcaklığa bağlı olarak oluşacak termal çatlamalara saf bitümlü bağlayıcı ve %1 ALY+%1 NKO ile %2 ALY+%2 NKO içeren modifiye bitümlü bağlayıcılar -28 °C'ye kadar direnç sergilerken, %3 ALY+%3 NKO içeren modifiye bitümlü bağlayıcı ise -34°C'ye kadar direnebilmektedir. Çizelge 4.8'de katkısız ve modifiye bitümlü bağlayıcıların PG sınıflandırma çizelgesi belirtilmiştir.

Çizelge 4.8 Katkısız ve modifiye bitümlü bağlayıcıların PG sınıflandırma çizelgesi.

Bağlayıcı Türü		Yaşlandırılmadan Önce				RTFOT ile Yaşlandırıldıktan Sonra				PG Sınıfı
Rafineri	Sınıf	Penetrasyon Değeri	Yumuşama Noktası (°C)	DSR G*/sinδ >1kpa		Penetrasyon Değeri	Kütle Kaybı (%)	DSR G*/sinδ >2,2kpa		
				Yenileme Sıcaklığı (°C)	Sınıfı			Yenileme Sıcaklığı (°C)	Sınıfı	
Batman	70/100	70,50	48	70,40	70	37,85	0,285	75,20	70	PG70-28
%1ALY+%1NKO		77,70	49	68,70	64	38,23	0,285	75,50	70	PG70-28
%2ALY+%2NKO		89,33	48,5	67,00	64	39,70	0,426	74,50	70	PG70-28
%3ALY+%3NKO		98,87	48	64,50	64	40,50	0,990	74,40	70	PG70-34

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesinde Ömrünü Tamamlamış Atık Lastiklerden piroliz yöntemi kullanılarak elde edilen Ağır Lastik Yağı ve Nanokromoksit kullanılmak suretiyle farklı bir bakış açısı getirilerek, deney sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Bu kapsamda, 70/100 penetrasyona sahip saf bitümlü bağlayıcıya, %1 ALY+%1 NKO, %2 ALY+%2 NKO ve %3 ALY+%3 NKO ağırlık oranında ilave edilerek, tüm numunelerin penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, DSR ve RTFOT deneyleri uygulanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılan numunelere ise yine penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri ile birlikte RTFOT+PAV ile yaşlandırıldıktan sonra da BBR deneyleri uygulanarak, bitümlü bağlayıcıların reometre özelliklerindeki değişim gözlemlenmiştir.

Bu özellikler penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, BBR, DSR, PAV ve RTFOT ile yaşlandırma deneyleri yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. 70/100 penetrasyona sahip saf bitümlü bağlayıcıya eklenen ALY ve NKO ile yapılan deneyler sonunda, ALY ve NKO'nun bitümlü bağlayıcı penetrasyonunu arttırdığı ve yumuşama noktası sıcaklığını ise azalttığı görülmüştür. Yumuşama noktasının ve penetrasyonun değişimindeki değerler göz önüne alındığında, ilave edilen katkı miktarı arttıkça penetrasyonun arttığı, yumuşama noktasının ise düştüğü görülmüştür. Yani bitümlü bağlayıcının sıcaklık hassasiyeti artmış kıvamlılığı ise penetrasyon değerinin artmasına paralel şekilde azalarak daha esnek bir yapıya sahip olmuştur. Penetrasyon indeksi de buna bağlı olarak artış göstermiştir. Bu da, katkı maddesi olarak ALY ve NKO'nun kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Bağlayıcının işlenme sırasında kolaylık göstereceği, yüksek sıcaklıklarda oluşacak deformasyonlara karşı direncinin ve tekerlek izi dayanımının bir miktar azaldığı ancak düşük sıcaklıklarda oluşacak termal çatlama ve kırılmalara karşı direncinin arttığı ve bitümü gençleştirdiği tespit edilmiştir.

Ulaşılan bu sonuçlar, ÖTL'den elde edilen lastik yağıyla, Taşçı (2010)'nın, Piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini incelediği çalışmada ve Lorasokkay (2014)'ın, Piroliz yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış atık lastikle modifiye edilen

bitümlü karışımların mühendislik özelliklerini incelediği çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.

Bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlanmalarını karakterize etmek için yapılan RTFOT deneyi ile katkısız ve modifiye edilmiş numunelerin kütle kayıplarındaki değişim belirlenmiştir. Yapılan deney sonrasında, katkı miktarının artmasıyla kütle kaybının da arttığı, ancak şartname sınırları içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Yaşlandırılmadan önce saf ve katkılı bağlayıcı numuneleri ile yapılan parlama noktası deneyinde, katkı miktarının artmasıyla parlama noktasının saf bağlayıcıya göre düştüğü ancak şartname sınırı olan 220 °C'nin üzerinde kaldığı görülmüştür. Burada ALY'nin yanıcılık özelliği nedeniyle parlama noktasını saf bağlayıcıya göre düşürdüğü ve güvenlik açısından herhangi olumsuz bir durum oluşturmadığı düşünülmektedir.

Bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık davranışının belirlendiği BBR deneyi sonuçlarına bakıldığında, 70/100 penetrasyon değerine sahip katkısız bitümlü bağlayıcıya ve %1 ALY+%1 NKO, %2 ALY+%2 NKO ve %3 ALY+%3 NKO oranlarında katkı maddeleri ilave edilerek, saf bağlayıcının, %1 ALY+%1 NKO ve %2 ALY+%2 NKO içeren katkılı bağlayıcıların Performans Sınıfları PG70-28 olurken, %3 ALY+%3 NKO içeren katkılı bağlayıcının ise PG70-34 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, katkı ilavesinin bitümlü bağlayıcının daha esnek hale gelmesini sağladığı, sıcaklığın düşük olduğu iklim koşullarına sahip bölgelerde ALY ve NKO ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

DSR deneyi sonuçları incelendiğinde, ALY ve NKO'nun, bitümün elastik davranışını bir miktar azalttığı, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı direnci az da olsa düşürdüğü, Performans Seviyesini yaşlanmadan önce PG 64-Y sınıfında sağlasa da, yaşlandıktan sonra yine şartname sınırları içerisinde kalarak PG 70-Y sınıfında sağladığı belirlenmiştir.

Özellikle ekonomik değeri yüksek petrolün türevi olan atık ürünlerin doğaya verdiği zararlar ve bu zararların uzun süreli oldukları düşünüldüğünde, bu tür ürünlerden elde edilen katkı maddelerinin kullanılabilirliğini artırmak, yapılan bu tez çalışmasının önemini de artırmaktadır. Katkı maddesi olarak kullanılan bu tür ürünlerin

hem doğaya verdikleri zarar azaltılmakta hem de bitümlü bağlayıcıların modifikasyonu gibi alanlarda kullanılarak, devletlerin ekonomisine de fayda sağlanmaktadır. Krom ise bulunması kolay ve maliyeti yüksek olmayan bir elementtir. Nanokromoksit de kromun çeşitli oksitlendirme yöntemleriyle elde edilmesi zor olmayan bir materyaldir.

Bu çalışma kapsamında saf bitümlü bağlayıcıya %1+1, %2+%2 ve %3+%3 oranlarında ALY ve NKO ilave edilerek, numuneler 150 °C sıcaklıkta, 5.000 d/d karıştırma hızında 30 dakika boyunca karıştırılarak hazırlandıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiş, ancak bu katkı maddelerinin değişik oranlarda ilave edilmesiyle ve farklı karıştırma kriterlerinde hangi sonuçların elde edileceği bilinmemektedir. Bu yüzden ileride yapılacak olan çalışmalarda, başka materyaller de eklenerek, farklı katkı oranlarda ve farklı numune hazırlama kriterlerinden elde edilecek modifiye bağlayıcıların performanslarının incelenmesi önerilmektedir.

Dünya genelinde, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin geri dönüşüm oranı ve teknikleri giderek artmaktadır. Piroliz yöntemiyle elde edilen lastik yağının, ekonomik değeri ve yanıcılık özelliği daha yüksek hafif fraksiyonu olan ürün daha çok sıvı yakıt olarak değerlendirilmekte, ikincil ürün olarak ayrılan yanıcılık özelliği daha düşük Ağır Lastik Yağı ise dizel jeneratörlerde tesislerin elektrik ihtiyaçlarını karşılamada kullanılmaktadır. Ağır Lastik Yağı ve Nanokromoksitin yalnızca bitümlü bağlayıcının modifiye edilmesinin haricinde başkaca disiplinlerde de kullanılabilirliğinin araştırılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

İleriki zamanlarda yapılması düşünülen çalışmalarda modifiye edilen bitümlü bağlayıcı üzerinde, performanslarının belirlenebilmesi için Marshall Stabilesi, Düktilite, Depolama stabilesi ve Viskozite gibi deneylerin de yapılması önerilmektedir. Bunlara ilave olarak, modifiye bitümlü bağlayıcıların uygun gradasyona sahip agregayla karıştırıldıktan sonra, stabilesinin belirlenebilmesi için Marshall Stabilesi Deneyi, adezyon performanslarının belirlenebilmesi içinse Nicholson Soyulma Deneylerinin yapılması önerilmektedir.

Yapılan deneysel çalışma sonunda, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden elde edilen Ağır Lastik Yağı ve Nanokromoksitin bitümlü bağlayıcıların performans özelliklerini değiştirmek için katkı maddesi olarak kullanılabilecekleri söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2006. Web Sitesi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/11/20061125-2.htm>, Eriřim Tarihi: 30.12.2019.
- Anonim, 2007. Web Sitesi: http://www.asmud.org.tr/usr_img/asfalt/turkiye_asfalt_endustrisi_raporu.pdf, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2009. Web Sitesi: <http://www.asmud.org.tr/asfalt.php>, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2014. Web Sitesi: <https://endustrimuhendisiadaylari.wordpress.com/2014/05/23/lastik-uretimi/>, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2017. Web Sitesi: <https://isfalt.istanbul/urunler/modifiye-asfalt/>, Eriřim Tarihi: 06.01.2020.
- Anonim, 2018a. Web Sitesi: <https://bartin.csb.gov.tr/atik-lastikler-haber-107115>, Eriřim Tarihi: 30.12.2019.
- Anonim, 2018b. Web Sitesi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/krom#haberler>, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2019a. Web Sitesi: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2019b. Web Sitesi: <https://www.refsan.com.tr/krom6035>, Eriřim Tarihi: 30.12.2019.
- Anonim, 2020a. Web Sitesi: <http://www.lasder.org.tr/otl/>, Eriřim Tarihi: 31.12.2019.
- Anonim, 2020b. Web Sitesi: <http://www.lasder.org.tr/otl-nasil-degerlendirilir/malzeme-geri-kazanim-piroliz/>, Eriřim Tarihi: 30.12.2019.
- Anonim, 2020c. Web Sitesi: https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7ffc9d95363387c_ek.doc?tipi=25&turu=X&sube=0, Eriřim Tarihi: 30.12.2019.
- Anonim, 2020d. Web Sitesi: <https://insapedia.com/bitum-nedir/>, Eriřim Tarihi: 05.02.2020
- Anonim, 2020e. Web Sitesi: http://www.remyapisal.com/index/tTech_crack_eng.htm, Eriřim Tarihi: 18.03.2020

Anonim, 2020f. Web Sitesi:

<https://www.facebook.com/InovatifKimyaDergisi/photos/a.557363460968972/953235354715112/?type=3&theater> , Eriřim Tarihi: 18.03.2020

Anonim, 2020g. Web Sitesi: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=33652>, Eriřim Tarihi: 01.05.2020.

Abd El-Maksoud, M. A. Gamea, G. R. and Abd El-Gawad, A. M. 2009. Rheological constants of four elements Burgers model for potato tubers affected by various fixed loads under different storage conditions. *Misr J. Ag. Eng.*, 26 (1), 359-384.

Ağar, E. ve Umar, F. 1985. Yol Üst Yapısı. İTÜ İnşaat Fakültesi matbaası, 339, İstanbul.

Ahmedzade, P. and Geckil, T. 2007. Influence of carbon black on the mechanical and electrical properties of asphalt mixtures. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 14(5), 358-364.

Ahmedzade, P. Yılmaz, M. ve Geçkil, T. 2008. Superpave sistemine göre uygulama bölgesine uygun bağlayıcı seçimi: Bingöl Örneği. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 25(4), 338-348.

Akbari, A. and Modarres, A. 2017. Effect of clay and lime nano-additives on the freeze–thaw durability of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 646-669.

Altaş, Ö. Y. 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 150, İstanbul.

Arabani, M. Haghi, A. and Tanzadeh, R. 2012. Laboratory study on the effect of nano-SiO₂ on improvement fatigue performance of aged asphalt pavement. In 4th International Conference on Nanostructures (ICNS-4), 12-14 March, Kish Island, Iran.

Arivalagan, K. Ravichandran, S. Rangasamy, K. and Karthikeyan, E. 2011. Nanomaterials and its potential applications. *International Journal of ChemTech Research*, 3(2), 534-538.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. 2001. Asfalt ve Uygulamaları. İSFALT Bilimsel Yayın, No:1, 280, İstanbul.

Asphalt Institute. 1994. Performance graded asphalt binder specification and testing, superpave series No. 1. SP-1, 70, Kentucky.

Asphalt Institute. 2007. The asphalt handbook, Seventh Edition, series No. 4. MS-4, 788, USA.

Barnes, H. A. Hutton, J. F. and Walters, K. 1998. An introduction to rheology, Vol. 3. Elsevier, 199, Amsterdam.

- Birlikler, R. Y. 1998. Bitümlü karışımlara eklenebilecek katkılar ile bu tip bitümlü karışımların davranışlarının araştırılması ve bir yorulma eğrisi tahmin modeli. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 214, İstanbul.
- Bowskill, G. Herbst, G. and Said, S. 1999. Choice of materials and design of flexible pavements for severe traffic and climates. PIARC Technical Committee on Flexible Roads, 197, UK.
- Bridgwater, A.V. 1990. Biomass pyrolysis technology, biomass for energy and industry, 5th E.C. Conference, G. Grassi, G. Gosse and G. Dos Santos, Elsevier Applied. Sci., London and New York, 2, 489-496.
- BS 3690-2. 1989. Bitumens for building and civil engineering. Part 1. Specification for bitumens for road purposes. British Standards Institution, 10, London.
- Chaala, A. Ciochina, O. G. and Roy, C. 1999. Vacuum pyrolysis of automobile shredder residues: use of the pyrolytic oil as a modifier for road bitumen. Resources, Conservation and Recycling, 26(3-4), 155-172.
- Çakıroğlu, M. 1996. Yol esnek üstyapıda oluşan bozulmalar. 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 154-163, 19-20 Aralık, İstanbul.
- Çelik, O. N. 2006. Karayolu ders notları. Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya.
- Cominsky, R. J. Huber, G. A. Kennedy, T. W. and Anderson, M. 1994. The superpave mix design manuel for new construction and overlays, SHRP-A-407. National Research Council, 184, Washington, DC.
- Çubuk, M. 2007. katkı maddeleri ile bitümün reolojik özelliklerinin geliştirilmesi ve esnek kaplama malzeme oluşumunda problemlerin giderilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 232, Ankara.
- Demirdöven, J. B. ve Arditi, D. 2012. Yapılarda ve yapım yönetiminde nanoteknoloji uygulamaları, 2. Proje Ve Yapım Yönetimi Kongresi, 13-16 Eylül, İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir.
- Dinç, E. 1999. Performans sınıfı asfaltlar, bağlayıcı özellikleri ve deneyleri. T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, 45, Sivas.
- Erşahan, H. ve Şara, O. N. 1996. Kömürlerin flash pirolizi ve kullanılan deneysel teknikler. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 9(2) , 53-68.
- Francken, L. 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Report 17. E & FN Spon, 220,London.

- Fulekar, M. H. 2010. Nanotechnology: Importance and applications. I.K. International Publishing House, 282, New Delhi.
- Ge, Z. and Gao, Z. 2008. Applications of nanotechnology and nanomaterials in construction. First International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-I), 4-5 August, Pakistan.
- Geçkil, T. 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 273, Elazığ.
- Giuffrè, T. Morreale, M. Tesorierve, G. and Trubia, S. 2018. Rheological behaviour of a bitumen modified with metal oxides obtained by regeneration processes. Sustainability, 10(3), 604.
- González, M. N. 2010. Rheology and engineering parameters of bitumen modified with polyolefins, elastomers and reactive polymers. Univerlag tuberlin, 187, Berlin.
- Günay, T. 2016. Nano malzemelerin bitümlü bağlayıcılarda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 202, İzmir.
- Hamed, G. H. 2017. Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt. Road Materials and Pavement Design, 18(6), 1375-1394.
- Hamed, G. H. Nejad, F. M. and Oveisi, K. 2016. Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide. Materials and Structures, 49(4), 1165-1174.
- Hamed, G. H. Nejad, F. M. and Oveisi, K. 2015. Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA. Road Materials and Pavement Design, 16(3), 536-552.
- Hicks, R.E. and Probst, R. F. 1983. Synthetic fuels. McGraw-Hill International Book Company, 490, New York.
- Hones, P. Diserens, M. and Lévy, F. 1999. Characterization of sputter-deposited chromium oxide thin films. Surface and Coatings Technology, Vol. 120-121, 277-283.
- Hunter, R.N. Self, A. and Read, J. 2015. The shell bitumen handbook, Sixth Edition. Shell Bitumen by ICE Publishing, 808, London.
- Hussein, A. A. Jaya, R. P. Yaacob, H. Hassan, N. A. Aletba, S. R. O. Huseien, G. F. Shaffie, E. and Hasan, M. R. M. 2019. Physical, chemical and morphology characterisation of nano ceramic powder as bitumen modification. International Journal of Pavement Engineering, 1-14.

- Ilıcalı, M. Tayfur, S. Özen, H. Sönmez, İ. ve Eren, K. 2001. Asfalt ve uygulamaları. İSFALT Bilimsel Yayınları, No.1. 280, İstanbul.
- İsfalt. 2002. Asfalt El Kitabı. İSFALT Bilimsel Yayınları, No.2. 573, İstanbul.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi. 2004. Shell bitüm el kitabı. İSFALT Bilimsel Yayın No.3. 334, İstanbul.
- Karahançer Ş. 2017. Nano modifiye bitümlü sıcak karışımların performansının araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 161, Isparta.
- Karayolları teknik şartnamesi. 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 525, Ankara.
- Kennedy, T. W. Huber, G. A. Harrigan, E. T. Cominsky, R. J. Hughes, C. S. Quintus, H. V. and Moulthrop, J. S. 1994. Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of shrp asphalt research program, SHRP-A-410. National Research Council, 170, Washington, DC.
- Köylü, K. 2019. Sözlü görüşme, Aydoğdu Köyü OSB Mevkii 17. Cadde No: 3 Merkez/Erzincan.
- Lav, A. H. Lav, M. A. and Whiteoak, D. 2004. Shell bitüm el kitabı. İsfalt Bilimsel Yayınları, 334, İstanbul.
- Lav, A. 2007. Bitümlü Bağlayıcılar (Türleri, Temel Özellikleri, Yapıları, Uygulanan Deneyler ve İlgili Şartnameler). 106. Eğitim Semineri Asfalt Günleri, 23-25 Mart, Konya.
- Limbachiya, M. C. and Roberts, J. J. 2004. Used/Post-consumer tyres. Thomas Telford, Kingston University, 335, London.
- Lorasokkay, M. A. 2014. Piroliz yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış atık lastikle modifiye edilen bitümlü karışımların mühendislik özellikleri. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 177, Konya.
- McGennis, R. B. Shuler, S. and Bahia, H. U. 1994. Background of superpave asphalt binder test methods, national asphalt training center demonstration Project 101. Asphalt Institute Research Center, 104, Lexington, KY.
- McGennis, R. B. Anderson, R. M. Kennedy, T. W. and Solaimanian, M. 1995. Background of superpave asphalt mixture design and analysis. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 160, USA.
- Mezger, T. G. 2006. The rheology handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers. Vincentz Network, 299, Germany.

- Navarro, F. Partal, P. Martinez-Boza, F. and Gallegos, C. 2005. Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen. *Energy & fuels*, 19(5), 1984-1990.
- Nejad, F. M. Tanzadeh, R. Tanzadeh, J. and Hamedi, G. H. 2016. Investigating the effect of nanoparticles on the rutting behaviour of hot-mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(4), 353-362.
- Orhan, F. 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü, 39, Ankara.
- Öcal, A. 2018. Nano malzemelerin bitümlü sıcak karışımların marshall ve superpave karakteristikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması ve modellenmesi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 286, Eskişehir.
- Önal, M. A. ve Kahramangil, M. 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı. Karayolları Genel Müdürlüğü, 200, Ankara.
- Özbay, N. 1998. Pamuk çiğidi pres küspesinin pirolizi ve ürünlerinin karakterizasyonu. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 170, Eskişehir.
- Öztürk, E. A. ve Çubuk, M. K. 2004. Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama. *Gazi Üniv. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 19, No 2, 175-184.
- Partl, M. N. Bahia, H. U. Canestrari, F. de la Roche, C. Di Benedetto, H. Piber, H. and Sybilski, D. 2012. Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: state-of-the-art report of the rilem technical committee 206-Atb, Springer, 453, Netherlands.
- Petersen, J.C. Robertson, R. E. Branthaver, J. F. Harnsberger P. M. Duvall, J.J. and Kim, S.S. 1994. Binder characterization and evaluation, Volume 4: Test methods, SHRP-A-370. Strategic Highway Research Program National Research Council, 197, Washington, DC.
- Rahman, A. N. E. Akmal, M. A. K. and Prasad, K. B. S. 2001. Pyrolysis of solid wastes. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 60(1), 52-59.
- Ramsden, J. J. 2011. Nanotechnology: An introduction. William Andrew, 288, Oxford.
- Read, J. and Whiteoak, D. 2003. The shell bitumen handbook, Fifth Edition. Thomas Telford, 460, London.
- Reubush, S. D. 1999. Effects of storage on the linear viscoelastic response of polymer-modified asphalt at intermediate to high temperatures. Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351, USA.

- Rezaei, S. Khordehbinan, M. Fakhrefatemi, S. M. R. Ghanbari, S. and Ghanbari, M. 2017. The effect of nano-SiO₂ and the styrene butadiene styrene polymer on the high-temperature performance of hot mix asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 35(6), 553-560.
- Roy, C. Chaala, A. and Darmstadt, H. 1999. The vacuum pyrolysis of used tires end-uses for oil and carbon black products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51(1999), 201–221.
- Saltan, M. Terzi, S. ve Karahancer, S. 2018. Mechanical behavior of bitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(3), 04018399.
- Shafabakhsh, G. H. Mirabdolazimi, S. M. and Sadeghnejad, M. 2014. Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 54, 566-571.
- Shokrlu, Y. and Babadagli, T. 2010. Effects of nano-sized metals on viscosity reduction of heavy oil/bitumen during thermal applications. *Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, Society of Petroleum Engineers, 19-21 October, Alberta, Canada.
- Speight, J. G. 2015. *Asphalt materials science and technology*. Butterworth-Heinemann, 650, UK.
- Sun, D.-X. Zou, Y. Wang H. and Weng H.-X. 2011. Study of road bitumen modified with heavy fraction of tire pyrolysis oil. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(19), 1822-1831.
- Tanzadeh, J. Vahedi, F. Kheiry, P. T. and Tanzadeh, R. 2013. Laboratory study on the effect of nano TiO₂ on rutting performance of asphalt pavements. In *Advanced materials research*. Trans Tech Publications Ltd. 622, 990-994.
- Tapkin, S. 2008. Mechanical evaluation of asphalt-aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(1), 27-40.
- Taşcı, A. 2010. Piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 107, Konya.
- TS EN 12591. 2011. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-kaplama sınıfı bitümler-özellikler. Türk Standartları Enstitüsü, 31, Ankara.
- TS EN 12592. 2015. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar-Çözünürlük Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 11, Ankara.
- TS EN 1426. 2015. Bitümlü ve Bitümlü Bağlayıcılar –İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, 16, Ankara.

- TS 132, 2012. Asfalt Emülsiyonlarının Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, 7, Ankara.
- TS EN 12607-1. 2015. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 1: RTFOT yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, 17, Ankara.
- TS EN 13398. 2018. Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Modifiye bitümün elastik geri kazanımının belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, 13, Ankara.
- Tunç, A. 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları. Atlas Yayınevi, 840, İstanbul.
- Tunç, A. 2004. Esnek kaplama malzemeleri elkitabı. Asil Yayın Dağıtım, 352, Ankara.
- Tunç, A. 2007. Yol malzemeleri ve uygulamaları (2. Basım). Nobel Yayın, 840, Ankara.
- Ulusal bilim ve teknoloji politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi. 2004. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, 75, Ankara.
- Uluçaylı, M. 1998. Modifiye bitüm ve modifikasyon katkıların kullanımı. 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 11-12 Aralık, 15-18, Ankara.
- Umar, F. Açar, E. 1985. Yol üstyapısı. I.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 339, İstanbul.
- Verstraeten, J. 1995. Bituminous materials with a high resistance to flow rutting. Association internationale permanente des Congrès de la Route, 142, France.
- Westrack Forensic Team Consensus Report. 2001. Superpave mixture design guide. Federal Highway Administration, 18, Washington, DC.
- Wilson, M. Kannangara, K. Smith, G. Simmons, M. and Raguse, B. 2002. Nanotechnology: basic science and emerging technologies. CRC Press, 290, USA.
- Wilson, M. Kannangara, K. Smith, G. Simmons, M. and Raguse, B. 2012. Nanoteknolojiye giriş, (Çev. E.Şentürk, İ. Okur, S. Duman, S. Akbulut), İstanbul Değişim Yayınları, 7-76, İstanbul.
- Xiao, P. and Li, X. 2006. Microstructure and cross blend mechanism of nanometer ZnO/SBS modified asphalt. Journal of Jiangsu University, Natural Science Edition, 6, 0-19.
- Xu, X. Guo H. Wang, X. Zhang M. Wang, Z. and Yang, B. 2019. Physical properties and anti-aging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder. Construction and Building Materials, 224(2019), 732–742.
- Yang, J. and Tighe, S. 2013. A Review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, 96, 1269-1276, Social and Behavioral Sciences, 13-16 August, China.

- Yazıcı, E. 2009. Ultrasonik spreyl piroliz tekniğiyle küresel gümüş nano-parçacıklarının üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 106, İstanbul.
- Ye, C. and Chen, H. 2009. Study on road performance of nano SiO₂ and Nano TiO₂ modified asphalt. New Building Materials, 6, 027.
- Zaniewski, J. P. and Pumphrey, M. E. 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. West Virginia University, 109, Morgantown.
- Zhang, D. Chen, Z. Zhang, H. and Wei, C. 2018. Rheological and anti-aging performance of SBS modified asphalt binders with different multi-dimensional nanomaterials. Construction and Building Materials, 18 (2018), 409–416.
- Zhang, H. Zhu, C. Yu, J. Tan, B. and Shi, C. 2015. Effect of nano-zinc oxide on ultraviolet aging properties of bitumen with 60/80 penetration grade. Materials and Structures, 48(10), 3249-3257.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Mehmet GÜNGÖR
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 1985 Ankara
Medeni Hali : Evli
Telefon : 4445388/2332
e-mail : mehmet.gungor@erzurum.edu.tr

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Cumhuriyet Anadolu Lisesi (Ankara)	2003

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Erzurum İl Özel İdaresi	2010
Denizli İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü	2010-2011
Denizli İl Özel İdaresi (Geçici Görevli)	2011-2014
Denizli İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü	2014-2016
Erzurum Teknik Üniversitesi	2016-Devam ediyor

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

Hakemli Dergiler

Ulusal Kongre Sunum

Uluslararası Kongre Sunum