



**NANO ZİRKONYUM DİOKSİT VE PİROLİZ YÖNTEMİ
İLE ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜMÜN
MODİFİYE EDİLMESİNDE KULLANILMASI VE
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa AKBULUT

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. M. Yasin ÇODUR**

2020

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NANO ZİRKONYUM DİOKSİT VE PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SİYAH
KARBONUN BİTÜMÜN MODİFİYE EDİLMESİNDE KULLANILMASI VE
REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa AKBULUT

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Yasin ÇODUR

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2020

Her hakkı saklıdır

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

**NANO ZİRKONYUM DİOKSİT VE PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN
SİYAH KARBONUN BİTÜMÜN MODİFİYE EDİLMESİNDE KULLANILMASI
VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR danışmanlığında, Mustafa AKBULUT tarafından hazırlanan bu çalışma 18 / 09 / 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 Yavuz DELİCE *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.

18 / 09 / 2020

İmzası

Mustafa AKBULUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO ZİRKONYUM DİOKSİT VE PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜMÜN MODİFİYE EDİLMESİNDE KULLANILMASI VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa AKBULUT

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR

Geleneksel bitümlerin, karşılaşılan trafik ve iklim koşulları altında asfalt kaplamalarda kullanımı, yapışma ve mekanik özellikler bakımından yeterli düzeydedir. Fakat zamanla değişen trafik ve iklim şartları kaplama üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır. Olumsuz etkileri asgari düzeye indirmek için bitüm modifikasyonu gereklidir.

Bu tez çalışmasının amacı, piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen karbon siyahı ve nano zirkonyum dioksit ($NZrO_2$) ile bitümün modifiye edilmesi, katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği, performans ve mühendislik özellikleri araştırılması ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine olan etkisinin incelenmesidir.

Bu çalışmada, ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen siyah karbon (SK) ve nano zirkonyum dioksit ($NZrO_2$) 70/100 penetrasyonlu saf bitüme ağırlıkça %1ALY+%1NKO, %2ALY+%2NKO ve %3ALY+%3NKO karıştırılarak numuneler elde edilmiştir. Bu numunelere penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR) ve dönel ince film halinde ısıtma deneyleri (RTFOT) uygulanmıştır. RTFOT ile yaşlandırılan numunelere tekrardan penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri uygulanmış, RTFOT+ basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ile yaşlandırıldıktan sonra da kirış eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanarak, bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerindeki değişim gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, katkı miktarı arttıkça bitümlü bağlayıcının giderek sertleştiği, sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, bitümün daha sıcak yerlerde kullanılabileceği, tekerlek izi dayanımının paralel bir şekilde arttığı ve düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı dirençli olduğu gözlemlenmiştir.

2020, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: BBR, DSR, Modifiye Bitüm, Siyah Karbon, Nano Zirkonyum Dioksit.

ABSTRACT

MS. Thesis

THE USE OF BLACK CARBON OBTAINED BY NANO ZIRCONIUM DIOXIDE AND PYROLYSIS IN THE MODIFICATION OF BITUMIN AND INVESTIGATION OF THE REOLOGICAL PROPERTIES

Mustafa AKBULUT

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR

The use of traditional bitumen in asphalt within the framework of traffic and climatic conditions is sufficient in terms of adhesion and mechanical properties. However, changing traffic and climatic conditions over time leave negative effects on the coating. Bitumen modification is required to minimize the adverse effects.

The aim of this thesis study is to modify bitumen with carbon black and nano zirconium dioxide (NZrO₂) obtained from pyrolyzed waste vehicle tires, to investigate the usability along with performance and engineering properties of additives in bituminous hot mixture and to examine the effects of these additives on the rheological properties of bitumen as well.

In this study, the penetration, softening point, flash point, dynamic shear rheometer (DSR) and The Rolling thin film ovens tests (RTFOT) of all samples has been applied by adding %1ALY+%1NKO and %2ALY+%2NKO and %3ALY+%3NKO in terms of weight into black carbon (BC) and nano zirconium dioxide (NZrO₂) 70/100 penetration pure bitumen obtained from end-of-life tires. Penetration, softening point and DSR tests have been applied to samples aged with RTFOT. By applying beam bending rheometry (BBR) experiments after aging with RTFOT+PAV (a pressure aging vessel), the change in the rheological properties of bituminous binders has been observed. As a result, it has been observed that as the amount of additives increases, the temperature sensitivity of the bituminous binder gradually decreases and the bitumen can be used in warmer places, the tire mark resistance increases accordingly, and it is resistant to thermal cracks at low temperatures as well.

2020, 76 page

Keywords: BBR, DSR, Modified Bitumen, Black Carbon, Nano Zirconium Dioxide.

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 kurucu Rektörü ve YÖK Üyesi Prof. Dr Muammer YAYLALI'ya ve yönetimine, laboratuvar çalışmalarımnda bana yardımcı olan arkadaşım İnşaat Mühendisi Mehmet GÜNGÖR'e minnet ve őükranlarımı sunarım.

Mustafa AKBULUT
Eylül 2020



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM	13
3.1. Materyal	13
3.1.1. Bitümlü bağlayıcılar	13
3.1.1.1. Katran	13
3.1.1.2. Asfalt	13
3.1.1.3. Bitüm.....	15
3.1.2. Bitümün elde edilmesi	15
3.1.3. Bitümün kimyasal bileşimi ve reolojisi.....	16
3.1.3.1. Bitümün kimyasal bileşimi	16
3.1.3.2. Bitümün reolojisi.....	18
3.1.4. Bitümlü sıcak kaplamalarda aranan özellikler	18
3.1.4.1. Stabilitate	19
3.1.4.2. Dayanıklılık.....	19
3.1.4.3. Geçirimsizlik	20
3.1.4.4. İşlenebilirlik	20
3.1.4.5. Esneklik.....	20
3.1.4.6. Yorulmaya karşı direnç	21
3.1.4.7. Kaymaya karşı direnç.....	21
3.1.5. Ömrünü tamamlamış lastikler ve yönetimi	21
3.1.6. Ömrünü tamamlamış lastiklerin çevresel etkileri	24
3.1.7. Ömrünü tamamlamış lastiklerin değerlendirilmesi	24
3.1.7.1. Doğrudan değerlendirme.....	25
3.1.7.2. Malzeme olarak değerlendirme	25
3.1.7.3. Termik değerlendirme	26

3.1.7.4. Hammaddesel değerlendirme	27
3.1.8. Siyah karbon	27
3.2. Yöntem	31
3.2.1. Piroliz	31
3.2.1.1. Piroliz türleri	32
3.2.1.2. Pirolizi etkileyen faktörler	32
3.2.2. Bitüm modifikasyonu	35
3.2.2.1. Bitüm modifikasyonunun amaçları	35
3.2.2.2. Bitüm modifikasyonunda aranan özellikler	37
3.2.2.3. Bitümün modifikasyonu için kullanılan katkıları ve özellikleri	37
3.2.2.4. Modifikasyon yöntemi ve yapılan deneyler	38
3.2.3. Bitüm sınıflandırma sistemleri	40
3.2.3.1. Geleneksel bitüm sınıflandırma sistemleri	40
3.2.4. Penetrasyon deneyi	42
3.2.5. Yumuşama deneyi	43
3.2.6. Parlama noktası deneyi	44
3.2.7. Superpave bağlayıcı sınıflandırma sistemi ve üstünlükleri	45
3.2.8. Numunelere uygulanan superpave deneyleri	48
3.2.8.1. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	48
3.2.8.2. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi	49
3.2.8.3. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi	49
3.2.8.4. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	53
4.1. Penetrasyon Deneyi Sonuçları	53
4.2. Parlama Noktası Deneyi (Cleveland Açık Kap Metodu) Sonuçları	54
4.3. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	55
4.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları	56
4.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları	57
4.6. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları	57
4.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları	60
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	76

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
G	Kayma Modülü
G*	Kompleks Kayma Modülü
gr	Gram
h	Kiriş Kalınlığı
kPa	Kilopascal
L	Mesnetler Arası Uzaklık
log	Logaritma
m	Sünme Oranı
Mj	Megajul
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
SK	Siyah Karbon
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
ZrO ₂	Zirkonyum Dioksit
ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastik
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PG	Performans Derecesi
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
SBS	Polistiren ve Polibütadien Esaslı Polimerler
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
TS	Türk Standartları
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Bitüm üretiminin aşamaları.	16
Şekil 3.2. Asfaltinin kimyasal yapısı.....	17
Şekil 3.3. Doymuş hidrokarbonların kimyasal dizilişleri	18
Şekil 3.4. Atık lastik yığını.	24
Şekil 3.5. Lastik resifi	25
Şekil 3.6. Siyah karbon üretim aşamaları.....	28
Şekil 3.7. Zirkonyum Dioksit.....	39
Şekil 3.8. Siyah Karbon.	39
Şekil 3.9. Yüksek devirli karıştırıcı.....	39
Şekil 3.10. Penetrasyon deney aleti.....	43
Şekil 3.11. Yumuşama deney aleti.....	44
Şekil 3.12. Parlama deney aleti.	45
Şekil 3.13. Bitümün farklı sıcaklıklardaki kıvamı	46
Şekil 3.14. Superpave performans sınıfı gösterimi (Kaçaroğlu 2019).....	47
Şekil 3.15. RTFOT deney aleti iç görünüş (a), RTFOT deney aleti deney tüpleri (b). ..	48
Şekil 3.16. PAV deney aleti	49
Şekil 3.17. DSR deneyi işleyişi.....	50
Şekil 3.18. Viskoelastik davranış grafiği	50
Şekil 3.19. BBR numunesinin görünüşü	52
Şekil 4.1. Bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin değişimi.	53
Şekil 4.2. Bitümlü bağlayıcıların parlama noktası değerlerinin değişimi.	54
Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinin değişimi	55
Şekil 4.4. Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmadan önceki ve RTFOT ile yaşlandırıldıktan Sonraki $G^*/\sin\delta$ sınır değerlerinin sağlandığı sıcaklık grafiği	59
Şekil 4.5. BBR deney numunelerinin hazırlanması (a), (b).	61
Şekil 4.6. BBR deneyi.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Türkiye’de ulaşım türleri arasında taşınan yolcu ve yük payları (%).....	1
Çizelge 3.1. Lastiğin yapısında bulunan bileşenler	22
Çizelge 3.2. Siyah karbonun tanecik boyutuna göre sınıflandırılması.....	30
Çizelge 3.3. Piroliz türleri.	32
Çizelge 3.4. Bitüm modifiyesinde kullanılan maddelerin sınıflandırılması.	38
Çizelge 3.5. Superpave deneyleri ve kullanım amaçları	47
Çizelge 4.1. RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon deney sonuçları.	53
Çizelge 4.2. Parlama noktası deney sonuçları.....	54
Çizelge 4.3. Yumuşama noktası deney sonuçları.....	55
Çizelge 4.4. Bağlayıcıların RTFOT ile yaşlandırma sonrası kütle kayıp oranları.	56
Çizelge 4.5. Bitümlü bağlayıcıların DSR deneyi sonuçları	58
Çizelge 4.6. Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR) sonuçları	61

1. GİRİŞ

Tarihin ilk dönemlerinde tekerleğin icat edilmesiyle başlanılıp günümüze kadar ulaşan süreçte, canlıların ve eşyaların herhangi bir yerden başka bir yere taşınmasında ulaşım, insanların en önemli temel ihtiyaçlarından biri olmuştur. İnsanların ve eşyaların bir yerden başka bir yere hareketi olarak tanımlanan ve sosyo-ekonomik gelişmenin temel itici güçlerinden olan ulaşım, günümüz dünyasında karayolları, demiryolları, denizyolları, havayolları ve boru hatları gibi farklı yollarla sağlanmaktadır. Türkiye’de ise ulaşım türleri arasında karayolunun yolcu ve yük taşıma payında çok büyük bir payı olduğunu görmekteyiz (Anonim 2014). Yolcu ve yük taşıma payları Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Türkiye’de ulaşım türleri arasında taşınan yolcu ve yük payları (%) (Anonim 2014).

ULAŞIM TÜRÜ	YOLCU TAŞIMA PAYI %	YÜK TAŞIMA PAYI %
Karayolu	89,8	89,5
Demiryolu	1,1	4,6
Denizyolu	0,6	5,9
Havayolu	8,5	0

Türkiye’de yolcu taşıma payının %89,8’ini ve yük taşıma payının %89,5’i gibi çok önemli bir bölümünü bünyesinde bulunduran ulaşım türü karayollarıdır. Karayollarında sath cinslerine göre yol uzunluklarını karşılaştıracak olursak toplam 66.567 km yolun 19.384 km’sini bitümlü sıcak karışım (BSK) oluştururken 43.726 km’sini sathi kaplamalar oluşturur. Geriye kalanı ise parke, stabilize ve toprak yol olmak üzere 3457 km’sini oluşturur. Kaplamaların üstyapısının oransal dağılımına baktığımız zaman %29,1’ini BSK %65,7’sini ise sathi kaplamalar oluşturmaktadır (KGM 2017).

Bu oranlardan hareketle bir ülkedeki gelişmişlik seviyesi hakkında yorum yapılabilir. Çünkü BSK’lar sathi kaplamalara göre daha maliyetlidir ve daha çok konfor sağlamaktadırlar. BSK’yı oluşturan karışımlarda ağırlıkça yaklaşık agrega %94-96 arasında, bitüm yaklaşık %4-6 oranlarındadır. Bitümün ağırlıkça yüzde olarak BSK’nın

1. GİRİŞ

az bir bölümünü kapladığı gözükse de fiyat, performans ve ömrü üzerinde büyük önemi bulunmaktadır.

Kaplamanın öncelikle trafik yüklerine ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olmasını ister. Bunun yanında minimum maliyet maksimum konfor esasına göre bitüm modifiye edilir. Modifiye bitümler gittikçe artan teknolojik imkânlarla ve çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilirler. Modifiye bitümler, kaplama ömrü de dikkate alındığında, petrol açısından çok da zengin olmayan Türkiye’de kaplamanın ömrünü artırıp klasik bağlayıcıların gerekli performansı veremediği yerlerde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda akademisyenler ve Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından birçok çalışma yapılmış olup “Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi” oluşturulmuştur.

Lastikler kullanım sürelerini doldurduklarında, diğer bir deyişle ömrünü tamamlatıldıklarında değerlendirilmesi gereken bir kauçuk kaynağıdır. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın, 25 Kasım 2006’da Resmi Gazete’de yayınlanan 26357 sayılı Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğinde ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL), yararlı ömrünü tamamladığı belirlenerek araçtan sökülen orijinal veya kaplanmış bir daha araçta kullanılamayacak durumda olan ve üretim esnasında ortaya çıkan ıskarta lastikleri diye isimlendirilmektedirler (Anonim 2006).

Atık lastiklerden birçok alanlarda faydalanılmaktadır. Atık lastikleri değerlendirmek genel olarak dört farklı yöntemden oluşmaktadır. Bunlar: doğrudan değerlendirme, malzeme olarak değerlendirme, termik olarak değerlendirme ve hammadde olarak değerlendirmedir.

Doğrudan değerlendirme: Lastiklerin ek olarak hiçbir işleme tabi tutulmadığıdır. Örnek verecek olursak eski lastiklerin ham olarak işlenebilmesi için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında çeşitli deneyler yapılmış. Yapılan deneyler sonucunda yığma binalarda duvar dayanımının arttırdığı ve bu etkinin ÖTL yardımıyla ortaya çıktığı belirlenmiştir (Türer ve Gölalmış 2005). Ralli pistlerinde güvenlik bariyeri, iskelelerdeki tekneler ve gemilerin gövde kısmında ise tampon görevi yerine kullanılmaktadır (Anonim 2011).

1. GİRİŞ

Malzeme olarak değerlendirme: Bu yöntemde iki çeşit uygulama yapılmaktadır. Lastik yeniden kaplanarak tekrar kullanılması sağlanır. Bir diğer faydası da atık lastik depolama alanlarındaki aşırı birikmeyi azaltmasıdır. Diğer uygulaması ise ömrünü tamamlamış lastiklerin içindeki çelik, kauçuk ve lif kısımlarına geri dönüşüm uygulanarak ayrıştırılırlar. Bu malzemeler tekrardan kullanılır (Anonim 2011).

Termik değerlendirme: Enerji değeri olarak karşılaştırıldığında kauçuğun kaliteli bir kömür kadar enerjisi vardır. Kauçuk bu sayede çimento fabrikalarında, termik santrallerde yakıt olarak da kullanılmaktadır (Anonim 2011). İnsanlar da ısınma amaçlı kullanılmaktadır.

Ham madde olarak değerlendirme: Yaklaşık olarak herhangi bir lastikten 4 litre yağ, 3 kg karbon siyahı, 1,5 kg gaz, 1 kg çelik ve kül elde edilirken bu maddeler tekrardan otomobillerde kalitesi düşük olarak gaz ve yağ olarak kullanılabilir. Ayrıştırmadan sonra lastikten çıkan çelik teller tekrar kullanılmaktadır (Anonim 2011).

Ömrünü tamamlamış lastiklerin avantajlarının yanında birçok dezavantajı da yanında getirmektedir. Günümüzde artan motorlu araç sayısına paralel olarak lastik sayısı artmış ve beraberinde birçok çevresel sorunu da meydana getirmiştir. Bu çevresel sorunlardan birisi de atık lastiklerden dolayı meydana gelen büyük yangınlardır. Yangınlar esnasında yüksek ısı ve yoğun duman ortaya çıkmaktadır ve kontrol edilip söndürülmesi zor olmaktadır. Yaklaşık bir lastiğin petrokimyasal olarak eşdeğeri 9,5 litre yağdır. Lastikteki yağın fazla olmasından dolayı lastik yangınları aylarca devam etmekte ve yangın sonucunda zehirli gazlar havaya doğru yayılmaktadır. Lastiklerin yanmasıyla atmosfere doğru fazla miktarda doğaya zararı olan bileşikler yayılmaktadır ve insanları kötü yönde etkilemektedir. Lastik yangınları, köpükle veya suyla söndürülmeye çalışıldığında havaya suya toprağa karşı kirlilik oluşturmaktadır. Diğer bir tehlike, atık lastikler haşerelerin yaşamasına ve çoğalmasına ve haşerelerden dolayı bulaşıcı salgın hastalıkların artışına sebep olmaktadır. Yağmurdan sonra yığınalarda ortaya çıkan zararlı böceklerin larvaları ve salgılarıyla çevreyi etkisi altına alarak şiddetli çocuk hastalıklarına neden olmaktadır. Atık lastiklerin değerlendirilmesinde önemli olan parametreler: çözüm aranırken çevreye zararı olmayan tekniklerin kullanılması, hammaddeye dönüşüm sağlanması, ekonomik ve yaygın kullanıma uygun

1. GİRİŞ

olması, kurulan endüstrilere zararın minimum seviyede tutulması ve elde edilen materyallerin ekonomik değerinin olması gibi etkileri barındırmasıdır (Karabörk ve Akdemir 2004).

Tezde kullanacak diğer bir madde de Zirkonyum dioksittir. Doğada 14 Zirkonyum minerali bulunur ve ekonomik açıdan en mühimleri zirkon ve baddeleyittir (Anonim 2002).

Eşitlik 1.1'de gösterildiği gibi zirkonyum metali üzerini saran oksit tabakası havaya karşı inaktif olmasına neden olur. Zirkonyumun havada yakılmasıyla zirkonyum oksit bileşimini ortaya çıkarır (Anonim 2012a).



ZrO₂ diğer oksitler gibi iyonik bağlıdır ayrıca saydamlık, ısı ve elektrik iletimine direnç, diamanyetizma, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda iyonik iletkenlik gibi 186 ayrıcalıklı meziyetlere sahip olmaktadır. Ayrıca yüksek gevreklik, sertlik ve elastik modülü, refrakterlik, düşük termal genişleme katsayısı, korozyona karşı direnç ve yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncına sahip olması bizlere avantaj sağlamaktadır (Toplan 2001).

Zirkon ve zirkonyum türevleri demir ve çelik fabrikalarında, refrakter malzeme, boya fabrikalarında, seramik endüstrisinde, kâğıt, tekstil, gübre, nükleer santrallerde, makine elamanlarında, uçak sanayinde, elektrik-elektronik sanayisinde kozmetik, kimya ve deri endüstrilerinde her geçen yıl daha fazla kullanılmaktadır ve daha önemli hale gelmektedir (Kırıkoğlu 1990).

Bu çalışmada Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden elde edilen siyah karbon (SK) ve Nano Zirkonyum Dioksit (NZrO₂) 70/100 penetrasyonlu saf bitümlle karıştırılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilen bitümler geleneksel bağlayıcı şartnamesi çerçevesinde penetrasyon, yumuşama noktası ve parlama noktası deneyleri yapılmıştır. Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi çerçevesinde ise RTFOT, PAV, DSR ve BBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerle modifiyenin bitümlü sıcak

1. GİRİŞ

karışımlarda kullanılabilirliği ve kaplamanın fiziksel ve reolojik özellikleri hakkında fikir sunmaktadır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ülkemizde ve Dünya genelinde durmadan artan araç sayısı beraberinde 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 teknolojiyle beraber artışa geçmiştir. 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 lastikten elde edilen siyah karbon kullanılarak yapılmış modifiye bitüm çalışmaları çok olsa da, oksit tozları kullanılarak yapılan çalışmalar nispeten daha azdır.

Amirkhanian (2001) yapmış olduğu çalışmada atık lastiği bitüme ve bitüm-agrega karışımına ayrı ayrı katıp özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak bitüme direk atıldığında diğer karışıma göre dayanımı daha az kayma direnci daha fazla çıkmıştır.

Hunt (2002) atık lastik katkılı bitümden yapılan bir esnek kaplamayla geleneksel olarak yapılan bir esnek kaplama tabakaları karşılaştırmıştır. Atık lastik katkılı olan esnek kaplamada diğer geleneksel kaplamaya göre çatlaklar daha az olduğundan dolayı bakım-onarım maliyetlerinde önemli bir düşüş görülmüştür. Bu yüzden atık lastik katkılı esnek kaplama hem performans hem ekonomiklik yönünden katkı sağlamıştır.

Engle et al. (2002) atık lastik katkılı kaplama ile geleneksel kaplamayı performans açısından karşılaştırılmıştır. Performans olarak aralarında fazla bir fark olmamasına rağmen sadece kış günlerinde yansıma çatlakları atık lastik kaplamada daha az meydana gelmiştir.

Dantas Neto et al. (2003) yapmış oldukları çalışmada atık lastik katkılı modifiye bitümün reolojik özelliklerini incelemiştir. Katkının penetrasyonunu azaltarak sertliği ve viskoziteyi arttırdığı çatlak oluşumunu azaltarak bağlayıcının performans açısından ömrünü uzattığı görülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Phetcharat and Kangsu (2003) Slurry seal denilen ve %60'ı bitümlü bağlayıcı ve %40'ı su olan bir soğuk asfalt çeşidi olup lastik tozuyla modifiye edilmiştir. Modifiye sayesinde esnekliği ve dayanımı artırmıştır ve bitümün kusmasını azaltmıştır.

Navarro et al. (2004) ağırlıkça %9 atık lastik kauçuğu ile modifiye edip bağlayıcının göstermiş olduğu davranışları incelemiştir. Görüldüğü üzere lastik kauçuk katkı yüksek sıcaklıklarda viskoziteyi artırıp düşük sıcaklıklarda ise tekerlek izi dayanımını artırıp yorulmadan dolayı meydana gelen çatlakları azaltmıştır.

Tortum vd. (2005) yaptıkları çalışmada, bitümlü bağlayıcıya otomobil lastiği katarak, marshall stabilitesi ve akma testlerinden yaparak optimum lastik katkı oranları tespit edilmiştir. Atık lastik parçacıklarının asfalt karışımları için hem sıcak hem de soğuk iklimlerde iyi bir modifiye aracı olduklarını belirtmişlerdir.

Hamzah et al. (2006) yaptıkları çalışmada, 80/100 penetrasyonlu saf bitümün içine parçalanmış atık lastik ilave edilerek modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini incelenmiştir. Reoloji dinamik kesme reometresi (DSR) ile incelemiş ve ayrıca bu bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerini tespit etmişlerdir. Sonuçta, öğütülmüş araç lastiği ilavesinin orijinal bitümün $G^*/\sin\delta$ değerini artırdığını ve dolayısıyla daha uzun bir yorulma ömrüne sahip olduğunu, yaşlanmadan daha az etkilendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, karışım numunelerinde öğütülmüş araç lastiği modifiyeli karışımların %24 daha yüksek Marshall Stabilitesi, %56 daha yüksek sünme rijitliği değeri verdiğini ve ısı hassasiyetini düşürdüğü gözlenmiştir.

Yıldırım (2007) farklı polimerlerin yapısındaki malzemelerin bitüme olan etkisini araştırmıştır. Kauçuk bağlayıcısının ise tekerlek izini ve çatlakları azalttığını esnekliği ise artırdığını görülmüştür. Fakat bağlayıcının kauçuk ile bitüm arasındaki aderansın iyi olmadığını kauçuğun bitümden ayrılabilirdiği gözlemlenmiştir.

Geçkil (2008) PG 58–28 (B 160/220) bağlayıcısına ağırlıkça %5, %10 ve %15 siyah karbon (SK) ilave edilerek PG 64–22 (B 70/100) ana bağlayıcısına dönüştürülmeye çalışılmıştır. Siyah karbon arttıkça düktilite ve penetrasyon

değerlerinde azalma, yumuşama ve parlama noktalarında ise artış meydana gelmiştir.

Bu durum, SK ilavesiyle bağlayıcıların sertliğinin, kıvamının ve viskozitenin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü göstermektedir. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; SK ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde iki sınıf (12 C°), tekerlek izi direncinde ise %462 kadar büyük artışlar olduğu ve çok yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabilceği görülmüştür. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; SK ilavesiyle bağlayıcının düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf (6 C°) kadar yükseldiği ve siyah karbonun %10'dan fazla kullanılması durumunda, bağlayıcı sertliğinin artmasında daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, SK ilavesiyle karışımların maliyetlerinde artışlar olmasına rağmen, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü süresince maruz kalacağı bakım-onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha az bir seviyeye indireceğinden uzun vadede baktığımız zaman daha ekonomik bir hal alacağı görülmektedir.

Paje et al. (2010) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş atık lastik kırıntısı ile üretilmiş bitümlü karışımları ve içinde hiçbir şey olmayan karışımı ses ve gürültü yönünden karşılaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda atık lastik ilavesi ile üretilmiş bitümlü karışımlardan yapılmış kaplamaların, referans bitümlü karışımdan yapılmış kaplamaya göre 2 dB kadar daha az ses ve gürültü düzeyi oluşturduğunu belirlemişlerdir.

Taşçı (2010) 50/70 bitüme sırasıyla bitüm ağırlığının % 3, % 6 ve % 9'u oranlarında piroliz yöntemiyle elde edilen atık lastik yağı ve karbon siyahı içeren üç ayrı karışım hazırlanmış ve sonuçlar saf bitüm değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kullanılan atık lastik yağının, bağlayıcının penetrasyon değerini artırdığı, yumuşama noktası değerini ise düşürdüğü görülmektedir. Katkı olarak kullanılan atık lastik yağının, bağlayıcının penetrasyon değerini arttırdığı, yumuşama noktası değerini ise düşürdüğü görülmektedir. Karbon siyahı, karışımın penetrasyon değerini sadece atık lastik yağı katkısına göre biraz daha düşük çıkarmaktadır. Karbon siyahı, karışımın penetrasyon değerini sadece atık lastik yağı katkısına göre biraz daha düşük çıkarmaktadır. Sonuç olarak, piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış hurda lastiklerin bitümün modifikasyonunda alternatif katkı maddesi olarak kullanılabilceği söylenebilir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kök vd. (2011) yaptıkları çalışmada, atık lastik kauçuğunun bitüm modifikasyonunda kullanımını incelemiş, ayrıca SBS ile karşılaştırmışlardır. Geleneksel deneyler, dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri ile değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, hem SBS hem de atık lastik kauçuğunun bitümün viskozitesini artırdığını, atık lastik kauçuğunun işlenebilirliği önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir.

Çelik vd. (2011) yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin pirolizle elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ve bu katkı maddelerinin bitümün reolojik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinde penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), dönel ince film ısıtma deneyi (RTFOT), kırılgan eğilme reometresi (BBR) deneylerini kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, katkı maddelerinin bağlayıcıdaki özelliklerini değiştirdiğini, atık lastik yağının sayesinde bitümün yaşlanmasını azalttığını gözlemlemişlerdir. Bitümün PG sınıfı ise PG 64-22'den PG 58-28'e değiştiğini, kullanılan katkı ile Marshall stabilitesinin azaldığını belirlemişlerdir.

Mashaan et al. (2012) yaptıkları çalışmada, bitümlü bağlayıcının performansını artırmak, asfaltın tekerlek izi direncini artırmak ve kalıcı deformasyonu azaltmak için asfalt modifikasyonunda atık lastikleri kullanmışlardır. Geleneksel bağlayıcılarla kıyaslandığında atık lastik ilavesinin az da olsa orta sıcaklıklardaki yorulma çatlaklarına karşı direnç gösterdiğini bulmuşlardır.

İmamoğlu (2012) yaptığı çalışmada, laboratuvar deneylerinde atık lastik katkılı asfaltın birleşenlerindeki değişimin ses sönümlemesindeki etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak atık lastik katkılı asfalt kaplamanın ses perdeleriyle beraber kullanılmaları durumunda ses perdeleri inşaa maliyetlerinde azalmaya ve efektif ses sönümlemesi sağlanmasına yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Xiao et al. (2012) yaptıkları çalışmada, PG 64-22 ve PG 52-28 performans dereceli saf bitüme ağırlıkça % 0, % 5, % 10 ve % 15 oranlarında 0,425 mm çapındaki atık lastik ile modifiye etmişler ve % 0, % 15, % 25 ve % 30 oranında geri kazanılmış asfalt kaplama içerikleri karıştırılarak 34 adet superpave karışımı hazırlamışlardır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Deneysel çalışmalar sonucunda, atık lastikler asfalt karışımın özelliklerini iyileştirmede başarılı olmuştur. Geri kazanılmış asfalt karışımlarda, atık lastik oranı artıkça optimum bağlayıcı içeriğinin ve agregalar arası boşluğun (VMA) azaldığını tespit etmişlerdir. Genel olarak atık lastik içeriğinin bağlayıcılarda hem geri kazanım hem de yapısal olarak olumlu bir katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Almeida Júnior et al. (2012) yaptıkları çalışmada, atık lastikler ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıları, modifiye etmede en yaygın olarak kullanılan stiren bütadien stiren (SBS) ile karşılaştırmışlar ve atık lastik ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcının SBS yerine kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Atık lastikle modifiye edilen bitümlü bağlayıcının, SBS standart özelliklerinin, sadece % 5'ini karşıladığını fakat AC 50/70 saf bitüme göre % 67 daha fazla süneklik gösterdiğini bulmuşlardır. Ekonomik olarak SBS ile birlikte kullanılması halinde % 10 tasarruf yapılabileceğini belirlemişlerdir

Geçkil (2013) öğütülmüş atık araç lastiğinden geri dönüştürülmüş kauçuk (CR) ile modifiye edilen bitümle ve bitümlü karışımların performansı stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bitümle çeşitli deneyler yapılmış ve bitümlü karışımların performansı ile karşılaştırılmıştır. Bütün testler sonucunda öğütülmüş atık araç lastiği ile modifiye edilen karışımların soğuk iklimli bölgelerde düşük sıcaklık çatlaklarıyla mücadelede etmede başarıları olacağı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında, atık araç lastiklerinden geri dönüştürülmüş kauçuk (CR) modifikasyonu ile SBS modifikasyonunun daha çok düşük sıcaklık davranışı bakımından karşılaştırılması sonucunda, CR modifikasyonunun SBS modifikasyonuna alternatif olabileceği ve bu sayede çok önemli ekonomik kazançların sağlanması ile birlikte atık lastiklerin çevrede oluşturacağı tehlikelerin de kolay bir şekilde önlenebileceği vurgulanmıştır.

Mashaan and Karim (2013)'te yaptıkları çalışmada, modifiye bitüm yapılırken karıştırma sıcaklığı ve karıştırma süresinin bitüme olan etkisi dinamik kesme reometresi (DSR) ve yumuşama noktası deneyleri kullanılarak araştırılmıştır. Sonuç olarak karıştırma sıcaklığı ve lastik içeriği önemli bir etkiye sahipken karıştırma süresinin önemli bir etkisi görülmemiştir. Atık lastik içeriğinin bitümlü bağlayıcıda

2. KAYNAK ÖZETLERİ

kullanılabilirliğini, G^* , elastik modül ve yumuşama noktası değerlerini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Lorasakkoy (2014) atık lastikleri piroliz yöntemiyle sıvılaştırılmış atık lastiklerin bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği incelenmiştir. Katkılı bağlayıcıların, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon ve düktilite değerlerinde artma, yumuşama noktasında ise azalma meydana gelmiştir. Atık sıvı lastik eklenmesiyle bağlayıcıların esnekliğinin ve sıcaklık hassasiyetinin arttığı görülmüştür. Karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) deneyi sonrası kütle kayıplarının şartnamenin öngördüğü %1 sınırının altında kaldığı tespit edilmiştir. Kütle kaybı sıvı lastik içeriğiyle doğru orantılıdır. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyinden elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcılardaki atık sıvı lastik oranı arttıkça G^* ve $G^*/\sin(\delta)$ değerinin azaldığı, faz açısının (δ) ise arttığı belirlenmiştir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; bağlayıcıdaki atık lastik içeriği arttıkça düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf yükseldiği tespit edilmiştir ve genel olarak malzemedeki esneklik ve sıcaklık hassasiyetinin arttığı görülmüştür.

Yi et al. (2016) mastik asfalt yapımındaki ince agrega ve filler yerine zirkonyum tungsten kullanmış olup 60/80 penetrasyonlu saf bitüme %0,%10,%30,%50 ve %100 oranında katılmıştır. Yapılan BBR deneyi sonucunda zirkonyum tungsten artışıyla Sünme rijitliğinin arttığı ve sünme oranının azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuçla zirkonyum tungstenin avantaj olarak termal çatlakları azalttığı ve bağlayıcılığı arttırdığı tespit edilmiştir. Fakat ince agrega ve fillere göre daha pahalıdır.

Rafi et al. (2018) PG 58 olan saf bitüme ağırlıkça %5 ve %10 nano parçacıklı karbon karasını $158 \pm 5 \text{ C}^\circ$ de 2800 rpm (devir) 45 dakika karıştırılarak modifiye bitüm elde edilmiştir. Saf bitüme ve ağırlıkça %5 ve %10 oranında nano parçacık olan bitüme çeşitli deneyler yapılarak karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda karbon karası içeriği arttıkça penetrasyon ve süneklikte azalma yumuşama noktasında artış meydana getirmiştir. Reolojik özellik olarak değerlendirilirse karbon karası artışının G^* (Kayma Modülü) nün artışına μ (Faz açısı) nın ise azalmasına yani malzemenin elastik özellik göstermesine yol açtığı bulunmuştur. Diğer bir etkisi ise PG değerinin artışına sebep

2. KAYNAK ÖZETLERİ

olduğudur.%10'luk katkı PG 58 değerini PG 70 değerine yükseltmiştir ve malzemenin daha sıcak yerlerde kullanılmasına sebep olmuştur. Genel olarak karbon karası malzemenin yüksek sıcaklıklarda ve kopmaya karşı daha dirençli hale getirir ve bitüm ve agregası arasındaki aderansı artırır.

Wang et all. (2019) saf bitüme (SH-70) %3,%6,%9,%12,%15 ve %18 oranında piroliz yönteminden elde edilen siyah karbon ilave edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda siyah karbon arttıkça elektriksel direnci, penetrasyonu ve sünekliliği azaltırken ısı iletkenliğini ve yumuşama noktasını artırmıştır. Reolojik özelliklerinde ise karbon karası artışıyla kayma modülünün arttığı faz açısının düştüğü belirlenmiştir. Genel olarak lastiklerin değerlendirilmesi ve bitüme katkıları açısından iyi bir katkı olarak belirlenmiştir.

Güngör (2020) ÖTLlerden elde edilen ağır lastik yağı (ALY) ve nano krom oksit (NKO) saf bitümlü 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, DSR ve RTFOT uygulanmıştır. Sonuç olarak katkıları sayesinde bitümün daha soğuk bölgelerde kullanılabileceği ve performansını artırdığı görülmüştür.

Daha önce yapılan modifiye bitüm çalışmalarında katkı malzemesi olarak ÖTLlerden elde edilen birçok katkı malzemesi kullanılsa da ÖTLlerden siyah karbon elde etmek için kullanılan piroliz yönteminin diğer yöntemlerden üstünlükleri hiçbir kimyasal katkı maddesi kullanılmadan uygulanabilir olması, prosesin kazançlı, güvenli ve çevre dostu bir dönüştürme yöntemi olmasını sağlamaktadır. Ayrıca atık lastiklerin piroliz yöntemi ile geri dönüşümü alternatif bir enerji kaynağı oluşturmakta ve çevre kirliliği ile mücadelede sosyo-ekonomik kolaylıklar sağlamaktadır.

Geçmişte siyah karbon ve metal oksitlerle ilgili farklı modifiye bitüm çalışmaları yapılmış olmasına rağmen piroliz yöntemiyle elde edilen siyah karbon ve metal oksit çeşidi olan nano zirkonyum dioksit ilk defa birlikte kullanılarak ve bitüme farklı oranlarda katılarak modifiye edilmiş bağlayıcıların özellikleri incelenecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada piroliz yöntemiyle elde edilen siyah karbon ve zirkonyum dioksit kullanılarak modifiye bitüm yapılmış ve çeşitli deneylerle özellikleri incelenmiştir

3.1.1. Bitümlü bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar bitümlü karışımlar içinde agregaları birbirine yapışmalarını sağlar ve agregalar arası boşlukları doldurarak geçirgenliği, donma ve çözünmeyi azaltır. Yapışkanlık özelliğiyle agregaların soyulmasını engeller. Bağlayıcının karışımda en fazla yüzdesel olarak ağırlıkça %5-%7'si ve hacimce en fazla %13-%15'i kadar var olmasına rağmen karışımda çok önemli bir pay oluşturur (Tunç 2007). Bitümlü bağlayıcılar asfalt ve katran olarak ikiye ayrılmaktadır.

3.1.1.1. Katran

Doğada oluşan kömür ve odunun karbonizasyonla ve hava olmayan yerde damıtma işlemi uygulanarak oluşturulurlar (Abraham 1945). Katran da bir bitümlü malzeme çeşididir. Birbirlerine çok benzeseler bile birbirinden karıştırılmamalıdır. Petrolden oluşturulan asfaltın çoğu bitümden oluşurken katrandaki bitüm yüzdesi petrol asfaltına göre daha azdır. Bu nedenle asfalt ve katran birbirlerine karıştırılmamalıdır.

3.1.1.2. Asfalt

Rengi tonu olarak kahverenginin tonlarından siyahın tonlarına kadar değişebilen, doğada katı ya da yarı katı halde bulunan ve sıvılaştırılabilmesi ısıtılarak ya da çözücüler katılarak yapılabilen bir bitümlü bağlayıcı çeşididir. Evrende saf olarak bulunabileceği gibi petrolün damıtılmasıyla da elde edilebilir. Asfaltlar, doğal ve yapay olarak gruplandırabiliriz. (İlıcılı 2001; Tunç 2007).

a. Doğal asfaltlar

Doğada bulunan petrolün bünyesindeki uçucu maddeleri kaybederek oluşurlar. Doğada diğer minerallerle beraber bulunup saf halde bulunmazlar. Elde edilmek istendiğinde farklı işlemler uygulanması gerekir. Doğal asfaltlar göl asfaltı, gilsonit ve kaya asfaltı diye gruplara ayrılmaktadır.

Göl asfaltı, dünyada doğal asfalt denilince en çok akla gelen türlerdir. Dünyadaki en çok göl asfaltı Trinidad'da bulunur ve içeriğinde ağırlıkça %54 bağlayıcı, %36 mineral madde, %10 organik madde vardır. Göl asfaltı ve gilsonit pek de kullanılmamasına rağmen az görülmekle beraber mastik asfalt üretiminde de katkı maddesi olarak kullanılabilir.

Gilsonit de göl asfaltına benzer şekilde çok sert ve çabukça kırılan özellikte olması ile tanınırlar ve çoğunlukla mastik asfaltın sertliğini dengelemek göreviyle kullanılırlar.

Kaya asfaltı ise madenlerden ya da taş ocaklarından elde edilir. Kayalardaki boşluklardan petrolle dolmasıyla birlikte ve zamanla petrolün içindeki uçucu maddeler kaybolur ve böylece kaya asfaltı oluşur. Kaya asfaltının pratikte kullanımı çok nadirdir ve sadece mastik asfaltlarla sınırlıdır. Ülkemizde en çok kaya asfaltı Güneydoğu Anadolu'da rastlanmaktadır.

Doğal asfaltları modifiye bitümlerin hazırlanmasında ve plentde agregayla karıştırarak kullanabiliriz (İlcalı 2001; Tunç 2007; Orhan 2012; Hunter et al. 2015).

b. Yapay asfaltlar

Ham petrolün ayrıştırılmasıyla oluşturulurlar. Petrol kuyularından alınan saf petrol pompalar yardımıyla tanklara, tanklardan ise damıtma kulelerine gönderilerek sıcaklığı yükseltilir ve damıtılarak ürünler oluşturulurlar. Uçucu maddelerin erkenden geç buharlaşma süreçleriyle birlikte hafif, orta ve ağır ürünler oluşmaktadır. Hafif ürünler uçucu maddelerin hemen buharlaşıp damıtılmasıyla oluşurken ağır ürünler geç

buharlaşıp oluşan ürünlerdir. Orta ürünler ise buharlaşmanın ne ağır ürünlerdeki gibi geç ne de hafif ürünlerdeki gibi erken buharlaşma sonucu oluşurlar. Oluşma süreleri hafif ve geç ürünler arasında oluşurlar (İlıcılı 2001).

3.1.1.3. Bitüm

Bitüm, yapay olarak ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen ya da doğal asfaltın içinde bulunan, toluende çok fazlaca çözünebilirliği olan ortam sıcaklıklarında çok viskoz ya da katıya yakın özellikteki, uçucu olmayan, yapışkan ve su geçirmez materyal olarak tanımı yapılabilir (TS EN 12597).

3.1.2. Bitümün elde edilmesi

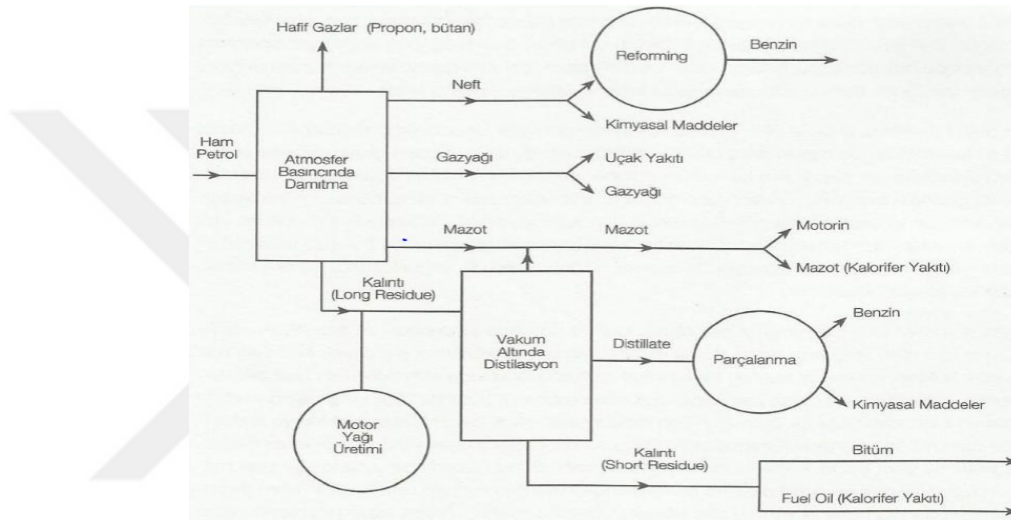
Ham petrol, dünyanın varoluşundan bugüne kadar deniz organizmalarının ve bitki kalıntılarının, çamurlar ve kayalarla birleşmesiyle oluşur. Yapısında hidrokarbonlar içeren ham petrol, birçok farklı maddenin de oluşmasını sağlarlar.

Yoldaki ana unsurların biri olan bitüm saf petrolün damıtılmasıyla elde edilir. Ham petrol damıtma kulesine girmeden önce 300°C-350°C arasında ısıtılır. Çünkü tesisin içine ne tam sıvı ne de tam olarak buhar olarak girmesi istenir. Damıtma kulesinin içine yarı buhar yarı katı olarak girmesi istenir. Damıtma kulesinin içinde daha iyi buharlaşıp yoğunlaşması için kubbemsi şekilde boşluklu bölmeler bulunmaktadır ve bu bölmelerden farklı ürünler açığa çıkmaktadır.

Buhar kısmı hafif bileşen olarak kalır ve damıtma kolonunun en tepesinden alınırlar. Bileşenlerin ağırlığı arttıkça daha aşağıdaki bölmelerden alınır. Burada alınan en hafif bileşen propan ve bütandır. Bu bileşenlerden daha ağır olan ve daha aşağıda olan nefittir ve genellikle kimya alanında ham madde olarak kullanılmaktadır. Daha sonra nefitten daha ağır olan gaz yağı daha aşağıda elde edilir. Gaz yağının kullanım alanı ise eskiden aydınlatmak maksadıyla kullanılarak günümüzdeyse soba olan evlerde sobayı tutuşturmak ve araçlarda zift kalıntılarını temizlemek için kullanılır. Gaz yağından daha ağır olan mazot ve motorin ortaya çıkar ve arabalarda yakıt ve ısınma sistemlerinde ortaya çıkar.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Hidrokarbon zincirlerinden oluşan ve en ağır bileşen olan bitüm en alt bölmeden çıkar fakat hammadde olarak kullanılabilmesi için ek olarak damıtmaya ihtiyacı vardır. Yüksek molekül ağırlığı ve bunun bitüm imalatı için hammadde olarak kullanılmasından önce başka işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bu kalıntı, vakumlu damıtma kolonunda ek bir damıtmaya tabi tutulur. Ortaya çıkan kalıntıyı kullanabilmek için 350 C°- 400 C°'de 10mm ila 100mm civa basıncındaki vakumla damıtma yapılır. İşlemler sonucunda bitüm kullanılacak hale gelir. Şema olarak bitüm üretim aşamaları Şekil 3.1'de gözükmektedir (Read 2003).



Şekil 3.1. Bitüm üretiminin aşamaları (Read 2003).

3.1.3. Bitümün kimyasal bileşimi ve reolojisi

Bitümün reolojik özelliklerini anlayabilmemiz için bitüm moleküllerinin yani hidrokarbonların kimyasal olarak bileşimini ve fiziksel yapısını bilmemiz gerekir. Çünkü bu özelliklerdeki en ufak değişim bitümün reolojisini etkileyecek ve değiştirecektir. Bundan dolayı kimyasal bileşim ve reoloji kavramlarını öğrenmek önemlidir (Hunter et al. 2015).

3.1.3.1. Bitümün kimyasal bileşimi

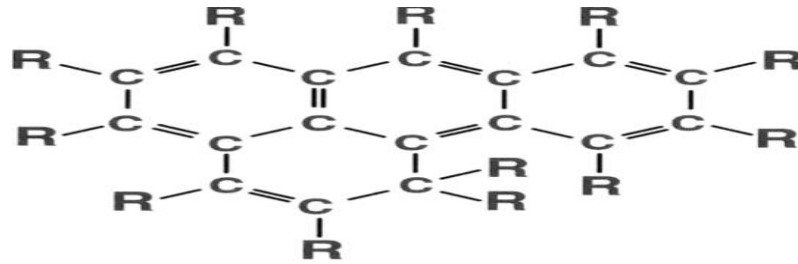
Bitüm elde edilmesinde ham petrolün damıtılması sırasında petrolün yapısında kimyasal değişimler olsa da genel olarak bitümün yapısı da aynı zamanda kendisini

3. MATERYAL ve YÖNTEM

oluşturan bitüme benzemektedir (Ilıcalı 2001). Bitüm, hidrokarbon moleküllerinden oluştuğu için bünyesinde ağırlıklı olarak hidrojen ve karbon elementleri varken eser miktarda ise metalik tuzlar, metal grubundan nikel, demir, vanadyum, kalsiyum ve magnezyumu barındırır. Bitümlerin içeriğinde çoğunlukla bulunan elementler %(82-88) Karbonlar %(8-11) Hidrojenler %(0-1,5) Oksijen %(0-6) Sülfür %(0-1) Azot bulunur (Tunç 2007).

Bitümün içeriği kesin olarak tespit edilemez. Bunun nedeni ise bitüm üretilirken ham petrolün kaynağının farklı olması ve üretim aşamalarında değişime uğramaları ve bitüm yapısındaki yaşlanma nedeniyle değişiklik gösterir (Whiteoak 2004). Bitümlü bağlayıcılar kimyasal yapısına göre asfalten ve malten şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

Asfaltenler maltenlerden farklı olarak n-heptanda çözünürler. Asfaltenlerin renkleri gri ve siyahtır. Molekül ağırlıkları fazla olup 600 ve 300.000 arasındadır. Bitümde yaklaşık %5-%25 arasındadır. Yaşlanmaya bağlı olarak bitümdeki asfalten içeriği artar ve sıkıntılara neden olur. Artışa bağlı olarak sertlik vizkozite ve yumuşama noktası artar. Kimyasal yapısı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. n-heptanda çözülmeyen maltenler reçineler aromatikler ve doymuş hidrokarbonlar olarak 3’e ayrılmaktadır.

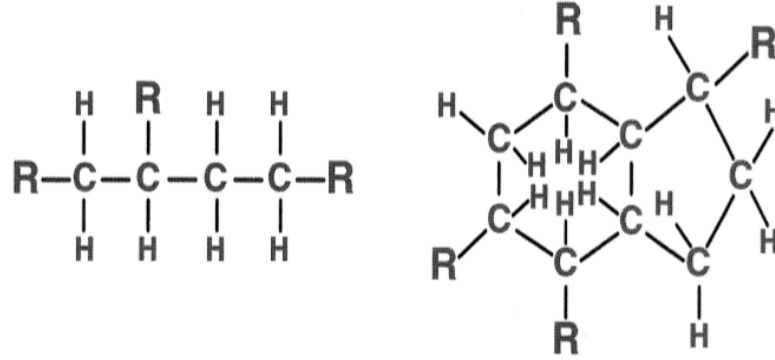


Şekil 3.2. Asfaltenin kimyasal yapısı (Ilıcalı 2001).

Reçineler de polar yapılıdır ve bu sayede kuvvetli bir adezyona sahiptirler. Molekül ağırlıkları 500 ile 50.000 arasındadır. Partikül ölçütleri 1.5 µm ve H/C atom oranı 1,3 ile 1,4 arasındadır.

Aromatiklerin rengi ise koyu kahverengi olan viskoz yapıdaki yağlardır. Bitümün içinde bulunma oranları yaklaşık %40 ve %60 arasındayken molekül ağırlığı 300 ve 2000 arasında değişmektedir.

Doymuş hidrokarbonların ise rengi yoktur. Yapısında naftanik ile parafanik yağ partikülleri vardır. Bitümün içinde yüzdesel olarak 5 ila 20 arasında değişir. Şekil olarak Şekil 3.3’de kimyasal yapısı verilmiştir.



Şekil 3.3. Doymuş hidrokarbonların kimyasal dizilişleri (Ilıcalı 2001).

3.1.3.2. Bitümün reolojisi

Reoloji, cisimlerin belirli bir gerilmede belirli bir zamandaki altında zamandaki şekil değişimini inceleyen bir bilim dalıdır. Bitümde reolojik malzemedir. Çünkü trafik yükleri, sıcaklık, yüklenme zamanı ve şiddetine göre değişkenlik gösteriler. Bitümü de bünyesinde barındıran asfalt üzerinde seyreden taşıtlar malzemenin yapısında akma meydana getirmeye çalışır. Bu yüzden malzemenin yapısında tekerlek izi veya çatlaklar görülebilir (Menapace et al. 2018).

Bitüm davranış olarak sıcak bölgelerde ve trafikte ağır seyreden veya duran araçlarda viskoz sıvı gibi davranış gösterirken soğuk bölgelerde ve hızlı hareket eden araçlarda elastik katı bir davranış göstermektedir (Geçkil 2008). Bu nedenle bitüm seçerken çevresel şartlara ve farklı sıcaklık parametrelerine uygun ve taşıma kapasitesi yüksek ve şekil değiştirmenin zor olduğu bitümler seçmeliyiz.

3.1.4. Bitümlü sıcak kaplamalarda aranan özellikler

Bitümlü sıcak karışımların hizmet ömrü boyunca en üst düzeyde fayda alabilmek için karışımın belli standartlara göre hazırlanması lazımdır. Bu standartlar

şartnamelerde açıkça verilmiştir. Karışım yapılırken karışımda aradığımız özellikler şunlardır:

- Stabilite
- Dayanıklılık
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulmaya karşı direnç
- Kaymaya karşı direnç

3.1.4.1. Stabilite

Trafikteki durağan ve hareketli taşıtların kaplama üzerinde uyguladığı kesme kuvvetlerinden kaynaklanan ve sonuç olarak kaplamanın deformasyona uğramamasını sağlayan dayanma gücüne stabilite denir. Deformasyonun olmaması için karışımdaki agrega çeşidini ve bitüm çeşidini ve kıvamını çok iyi seçmemiz gerekir. Aynı zamanda kaplamanın üzerinde oluşan trafiğin tipinin ve hacminin çok iyi tayin edilmesi gerekirken meteorolojik şartlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü yüksek stabilite istediğimiz kaplamalarda tekerlek izi ve deformasyon oluşmaması için kıvamı yumuşak ve penetrasyonu düşük bitümler seçmeliyiz. Fakat seçim yapılırken stabilite yüksek olsun diye çok sert bitümler seçersek bu da iyi değildir. Çünkü çok sert olduğundan dolayı daha kolay çatlaklar ve deformasyonlar oluşacaktır bu nedenle dengeyi çok iyi sağlamamız gerekir (Tunç 2007; Arslan 2010).

3.1.4.2. Dayanıklılık

Dayanıklılık bitümlü sıcak karışımların hava, su ve sıcaklık gibi çevresel özelliklere karşı direncinin ölçüsüdür. Hava bitümün yaşlanmasına yol açarken su ise boşluklardan geçerek donma-çözünmeye neden olması nedeniyle bu kötü etkileri kırmak için gradasyonu iyi derecelendirilmiş ve bitüm içeriği yüksek karışımlar planlanmaktadır. Bitüm içeriği yeterli miktardaysa taneler arası etkileşim daha iyi olacağından ve bitüm kalınlığı fazla olduğundan yaşlanmaya ve dayanıklılığa karşı

avantaj sağlamaktadır. Yeterli miktarda bitüm içeriği olmayıp fazla olduğunda tekerlek izine karşı direnci daha azalır ve yüksek stabiliteye neden olur ve stabilite ilk başlarda güzel bir özellik gibi gözükse de fazla stabilite asfalt tabakasında çatlaklar ve kırılmalara neden olur. Bitüm miktarı az olduğunda ise agregaları sağlıklı bir şekilde sarmayacağından soyulmalara neden olur. Eğer dayanıklı bir asfalt istiyorsak gradasyonu iyi şekilde derecelenmiş ve karışımdaki bitüm miktarını ve çeşidini uygun bir şekilde seçmemiz gerekir (Tunç 2004).

3.1.4.3. Geçirimsizlik

Asfaltın içindeki boşluk kanallarından dolayı içine hava girmesi sonucu tabaka oksijenle birleşerek yaşlanmayı meydana getirmektedir ve yine aynı boşluk kanallarından su içeriye girerek tabakada donma çözünme oluşturmaktadır. Yaşlanma ve donma-çözünme etkilerinden tabakayı arındırmak için geçirimsizliği çok iyi ayarlamak gerekir. Geçirimsiz olması için bitüm miktarının iyi yapılması agrega gradasyonun güzel bir şekilde derecelendirilmesi ve sıkışmanın yeterli derecede yapılması önemlidir (Önal ve Kahramangil 1993; Clark et al. 2017).

3.1.4.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, bitümlü sıcak karışımın hazırlanmasında, bir yerden bir yere sevkinde, yere serilmesinde ve sıkıştırılmasındaki bize karşı göstermiş olduğu kolaylığın ölçüsüdür. İşlenebilirliğin düşük olması uygulamadaki yanlışların artmasına ve daha fazla iş gücüyle daha az iş yapılmasına yol açacağından işlenebilirliğin kararında olması istenir (Ye et al. 2009). Bu yüzden işlenebilirlik açısından gradasyon bitümün kıvamı ve çeşidi ve ortam sıcaklığı işlenebilirlik açısından önemli parametreler oluşturur.

3.1.4.5. Esneklik

Esneklik alt temel tabakasındaki çatlamalara deformasyonlara karşı koyma yeteneğidir. Çatlaklar tabakadaki düzensiz oturmalarından dolayı meydana gelmektedir. Esnekliği ayarlama bitüm içeriği ve agregadaki boşlukları ayarlayarak geliştirebiliriz.

Esnekliği iyi olarak ayarlayamazsak düşük stabilite tabakada deformasyonlar ve agregabitüm karışımlarında soyulmalar meydana gelmektedir. Bu yüzden esnekliği ayarında ayarlamamız gerekir (Tunç 2004).

3.1.4.6. Yorulmaya karşı direnç

Yorulma karışımın sürekli trafik yüklerinden dolayı kalıcı olan çatlaklara müsaade etmeyerek karşı koyma yeteneğidir (Tunç 2001). Yorulmalardan dolayı yorulma dayanımı arttığı için çatlaklar meydana gelir. Yorulmanın yeterli düzeyde olması için yoğun gradasyonlu kıvamı az olması penetrasyonu ve bitüm miktarının ise fazla olması gerekir. Doğal olarak malzememiz ne kadar esnekse aynı ölçüde o kadar yorulma mukavemetinde artış sağlanmaktadır (Tunç 2004).

3.1.4.7. Kaymaya karşı direnç

Arabaların fren yapabilmesi için ve savrulmalara mahiyet vermemek için tekerlek ve kaplamanın arasındaki olması gereken dirence kaymaya karşı direnç denir. Kayma direnci kırma taş ve pürüzlü ve kaba agregalarla beraber artışa geçer. Agregaboyutunun direnç üzerinde çok önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Pürüzsüz bir kaplama bize güzel konfor sağlasa da kayma direncini düşürür. Kaplamada yeterli miktarda pürüzlülük beklenir. Kayma direnci için gerekli bitüm miktarı olması lazımdır. Gereğinden fazla olan bitüm stabiliteyi azaltırken aynı zamanda kalın bir tabaka oluştururken kayma direnci azalmaktadır (Macit 2003).

3.1.5. Ömrünü tamamlamış lastikler ve yönetimi

Dünyada her yıl tahmini 1 milyar adet atık lastik oluşturmaktadır ve bu lastikler ağırlıkça 14,86 milyon tona denk gelmektedir. Türkiye’de 40 yılı aşkın bir süredir lastik üretmektedir. Türkiye’de araç ve lastiğe olan artışa binaen lastik oluşumun da da artış meydana gelmektedir (Martinez et al. 2013). Lastik artışıyla beraberinde doğada kendi kendine kaybolmayacağından depolama, geri dönüşüm ve çevre sorunları gibi sorunlar meydana getirmektedir. Kimyasal olarak yapısını meydana getiren polimerik bağlar ve diğer katkı maddelerinden dolayı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Lastik, çoğu malzemeyi

3. MATERYAL ve YÖNTEM

kullanarak yapılan ve farklı malzemelerden oluşan ve yapımında yüksek teknolojik imkânlar kullanılan bir malzemedir (Terry and Hammer 2004). Genel olarak normal olan bir otomobil lastiği bünyesinde 30 çeşit sentetik kauçuk, 8 tip karbon siyahı, çelik kord, polyester, naylon gibi maddeler bulundurur ve bulunan maddeler ayrıntılı olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Lastiğin yapısında bulunan bileşenler (Pehlken and Essadiqi 2005).

Temel kompozisyonu	Ana katkı maddeleri	Toplam,%
Kauçuk	Doğal ve yapay kauçuk	51
Takviye edici maddeler	Karbon karası, Silis	25
Yumuşatıcılar	Petrol işleme yağ, Petrol sentetik reçine	19,5
Vulkanizasyon hızlandırıcılar	Tiyazol hızlandırıcı, Sülfenik asit hızlandırıcı	1,5
Vulkanizasyon ajanı	Sülfür, Organik Vulkanizatörler	
Vulkanizasyon hızlandırıcı yardımcı.	Çinko Oksit, Stearik asit	1
Antioksidan	Amin Antioksidan, Fenol Antioksidan Balmuru	0,5
Doldurucu Maddeler	Kalsiyum Karbonat, Kil	1,5

Tablodan da öngörüleceği üzere Lastiğin yaklaşık %70-%80 arası karbonlu materyallerden oluşur ve tekrardan dönüşüm yapılabilir. Fakat kauçuğun geri-dönüşümü gün geçtikçe önemini yitirmektedir. Çünkü geri dönüşüm yoluyla yapılan lastikler istenilen performansı vermemektedir (Lindenmuth 2006). Lastiğin kauçuğu oluşturan bölümleri doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kauçuğa ek olarak dayanımı artırmak için lastiğin yapısında naylon, polyester gibi tekstil elyafı, çelik tel bulunmaktadır. Bunlara ilave olarak kimyasal koruyucular ve karışımın sağlanması ve homojenliği için de kimyasal yağlar kullanılır. Lastiğin yapısını oluşturan kauçuk herhangi bir dış etki olmadan değişmemektedir (Emiroğlu 2006). Fakat lastiklerin kullanımdan sonra ağırlıklarında kayıp yaşanır. Ortalama bir otomobil lastiği 11 kilogramken kullanımdan sonra 9 kilografa düşerken kamyon lastiği 54 kilogramdan 45 kilografa düşmüştür (Biennial Reports 2009).

Avrupa Birliği ÖTL hem depolanmadaki sıkıntıları ve çevreye vermiş olduğu sıkıntılardan dolayı birtakım önlemler almışlardır. Kronolojik olarak aldıkları önlemler şunlardır:

- 1999’da ÖTL depolanması (1993/31/EC) kararlaştırılmıştır

- 2000 yılında ÖTL'lerle ilgili yayımlanan direktifte (2000/53/EC) ise hurda araçların üstündeki lastikler için sökülme zorunluluğu getirilmiştir
- 2003 yılından sonra ÖTL'lerin olduğu gibi depolanması yasaklanmıştır.
- 2006 yılından itibaren ise parçalanarak depolanması da yasaklanmıştır (Anonymous 1999).

2006 yılında ÖTL ilgili ilk defa yönetmelik hazırlanmış fakat çalışmalar diğer diğer ülkelerin gerisinde kalmıştır (Anonim 2006). 2007 yılındaysa ülkemizdeki Continental, Pirelli, Goodyear gibi ünlü lastik firmaları birleşerek Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER)'i kurmuşlardır. LASDER hedef olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin toplanması ve çevreye vermiş olduğu sıkıntıyı en aza indirmektir ve tüketiciyi bu konuda bilinçlendirmektir (Anonim 2012b).

Lastiklerin her geçen gün artışı göz önüne alındığında depolama ve geri dönüşüm sıkıntısı ortaya çıkarmaktadır. Lastiklerin bizlere karşı göstermiş olduğu sıkıntılardan kurtulmak ve yüksek enerjilerinden faydalanmak için Piroiliz, gazlaştırma ve yanma gibi işlemlerden geçerek enerji üretimi gerçekleşir (Aylon et al. 2010).

Son zamanlarda ÖTL'lerin geri dönüşümü için lastiklerin fabrikalarda çeşitli boyutlarda parçalaması ve öğütülmesi gerekir. Bu aşamalardan sonra lastiklerin yakılmasıyla elektrik ve termal enerji üretilmesi gibi birçok girişimde bulunmaktadır. Atık lastikler boyutlarına göre farklı sektörlerde kullanılmaktadırlar. Bütün hâldeki lastikler; oyun ve motorlu spor pistlerinde, limanlardaki yavaşma noktalarında ve dalga kırıcı olarak, toprak kaymasını önlemek için park alanlarında, ses sönümleyici olarak, denizlerde deniz canlılarının yaşayabilmesi için kullanılabilirler. İri lastik parçaları ise katı atık depolama tesisindeki sızan suların toplanması, çimento fabrikalarında yakıt olarak, elektrik üretim amacıyla termik santrallerde yakıt olarak kullanılabilir (Anonymous 2015). Örnek bir atık lastik yığını Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4. Atık lastik yığını.

3.1.6. Ömrünü tamamlamış lastiklerin çevresel etkileri

Ömrünü tamamlamış lastiklerin depolanmasıyla birlikte depolanma alanlarındaki lastik yığınlarında farklı sıkıntıları beraberinde getirmiştir. Bu sıkıntılardan biri de çıkarmış olduğu yangınlardır. Şekil itibariyle lastiklerin arasındaki hava boşlukları nedeniyle yangının ilerlemesini kolay kılmıştır. Ayrıca ortalama bir lastiğin içinde 9,5 litre yağ vardır. Lastiğin içindeki yağ yüzünden yoğun ısı ve duman çıkar. Isı ve duman yangının söndürülmesini güçleştirir. Yangın esnasında etrafa yayılan zehirli gazlar ise çevredeki toprak, su ve hava kirliliğine neden olur. Bu kirlilik de insan hayatı için son derece zararlıdır (Anonymous 2004). Zehirli gazlardan etkilenme derecesine ve süresine bağlı olarak insanlarda; deri ve gözde tahriş, solunum güçlükleri, sinir sisteminde düşme ve kanser gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Lastik yanmasıyla oluşan emisyon; kömür ve odun gibi fosil yakıtların oluşturduğu emisyonlardan çok daha zararlı olduğu tespit edilmiştir. Lastiklerdeki boşluklarda kemirgen ve haşerelerin yuvası haline gelmektedir ve boşluklara gelen su birikintileri sivrisineklerin çoğalmasına zemin hazırlamaktadır. Bu durumda bulaşıcı hastalıkların yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Örnek olarak Ohio’da çocukların yakalandığı salgın hastalıkların yüzde 80’inin atık lastiklerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Anonim 2004). Lastiklerin etrafa olan kötü etkilerini bertaraf etmek için geri dönüşüme ağırlık vermemiz gerekir.

3.1.7. Ömrünü tamamlamış lastiklerin değerlendirilmesi

Dünyada ulaşım olan ihtiyacımız beraberinde araç sayısındaki artışa, araç sayısındaki artış ise lastik tüketimini artırmıştır. Dünyadaki lastik üretiminin artmasıyla çevresel kirliliklere sebep olacağından lastikleri doğru geri dönüşüm yöntemleriyle

dönüştürmeliyiz (Martinez et al. 2013; Saleh et al. 2014). Atık lastiklerin etrafına olan zararlı etkilerini kırmak için hiyerarşik düzende sırasıyla atık oluşumun engellenmesi, engellenemiyorsa azaltılması, atığın tekrardan kullanılabilmesi, atığın geri dönüştürülmesi ve kazanılması son olarak atığın bertarafı uygulanmalıdır (Onay ve Koca, 2015). ÖTL'lerin geri dönüşüm yöntemleri doğrudan, malzeme, termik ve ham maddesel değerlendirme yöntemleri vardır.

3.1.7.1. Doğrudan değerlendirme

Genel olarak hiçbir işleme tabi tutulmadan direkt olarak atık lastiklerin kullanılmasıdır. Atık lastikler şekli, boyutu dış darbelere karşı dayanıklılığı ile birçok alanda olduğu gibi kullanabiliriz. Lastikler oyun pistlerinde kenarlarda koruyucu olarak limanlarda ise gemilerin sorunsuz şekilde kıyıya yanaşabilmeleri için limanlarda kullanılabilirler. Ayrıca deniz canlılarının yuva yapabilmeleri için denizde de resif olarak kullanılabilir ve Şekil 3,5'te örneği görülmektedir (Sullivan 2006; Sienkiewicz et al. 2012). Lastik resifler, balık türleri için yaşanabilecek uygun bir ortam yaratır ve gelgit ve fırtına gibi doğa olaylarının benzerini yaşatarak balıkları doğal ortamındaymış gibi yaşatırlar. Diğer bir kullanım alanı ise ev yapımında kullanılabilmesidir ve örnek ev yapımında 3000 ÖTL kullanılmıştır (Environmental Protection Agency 1992).



Şekil 3.5. Lastik resifi (Anonim 2015).

3.1.7.2. Malzeme olarak değerlendirme

ÖTL'lerin tekrar kullanılabilmesi için fiziksel yolların kullanıldığı değerlendirilme biçimidir. Kaplama ve parçalara ayrılma olarak iki farklı yolu vardır. Pratikte lastiğin içindeki malzemeler dayanıklıdır ve içindeki kauçuk çelik gibi maddeler tekrar kazanılabilir (Tunç 2009). Lastiklerde kullanılmasıyla aşınma ve

yırtilma oluşur ve bu da lastiğin performansını etkiler. Lastiğin gövdesinde sorun olmadığı takdirde lastik tekrar kaplanabilir. Kaplama da lastiğin teknik özellikleri de uygun olmalıdır. Lastik işe yaramaz sınıfa geçinceye kadar iki kez kaplanabilir. Lastik kaplaması yapıldığında yeni bir lastik almaya ihtiyaç duyulmadığından dolayı ekonomiklik sağlar ve depolamadan dolayı oluşacak maliyeti azaltmaktadır (Anonim 2016; Sienkiewicz 2012). Ancak kaplama yapmak pek tercih edilmemektedir. Çünkü kaplama maliyeti hemen hemen lastik fiyatıyla aynı olup kaplamalar genelde iş makinası, kamyon ve uçak lastiklerinde uygulanmaktadır (Chandrasekaran 2007). Bir diğer kullanım da parçalanarak kullanılmasıdır. Çeşitli makinelerle parçalara ayrılmaktadır ve parça boyutlarına göre çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Parçacıkların toz ve kırıntı hali daha fazla kullanılmaktadır (Tunç 2009). Parçalanarak tanecik hale getirilen lastikler otomotiv sektöründe, oyun parklarında, spor alanları parkelerinde, inşaatlarda yapı malzemesi olarak, asfalt üretimleri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründeki bağlayıcılarda çok iyi sonuçlar almaktayız. Asfaltta oluşan çatlamları ve tekerlek izlerini azaltmış buzlanmayı önlemiş ve ses yalıtımını sağlamıştır. Bu özellikleriyle asfaltın performansını ve ömrünü çoğaltmıştır. Bir başka yapı malzemesi olan betonda ise ısı ve ses yalıtımında pozitif özellikler göstermiştir (Paine et al. 2004; Rubber 2006; Anonymous 2012).

3.1.7.3. Termik değerlendirme

Atık lastiklerin enerji elde etmek için çeşitli işlemlerle yakılması da bertaraf yöntemidir. ÖTL'lerin yakılması sonucu elde edilen ısı ve elektrik enerjileri elde edilirken fabrikalarda ve binalarda buhar yardımıyla da binalar ısıtılır. Çimento ve kâğıt fabrikalarında üretim yapılması için yakıt olarak kullanılabilirliğine ek olarak enerji elde edilmesi ve doğadaki kaynakların azalmamaları gibi faydaları vardır. Amerika'da ÖTL'lerin %52'si yakıt amaçlı kullanılmaktadır (Myhre et al. 2012). Lastikler yaklaşık olarak %60 oranında hidrokarbonlardan oluştuğu için fazlaca ısı açığa çıkarırlar. Lastiklerin açığa çıkardığı ısı 32 MJ/kg ila 34 MJ/kg arasındadır ve kok kömüründen bile daha fazla ısı değerine sahiptir. Yandıklarında büyük bir ısı ortaya çıkar. Ortaya çıkan ısı elektrik üretiminde, çimento fabrikalarında kullanılır (Huan et al. 2012; Rada et al. 2012). Yakıt olarak kullanılan lastikler bütün bir şekilde ya da çelik tellerinden ayrılmış ya da parçalanmış olarak kullanılırlar. Fakat en ekonomiyi bütün olarak yani

işlenmeden direkt olarak yakılandır. Seçimi de işletmenin koşullarına bağlı olarak lastikler parçalanarak veya bütün bir şekilde yakıcılarda yakılmakta ve üretilen ısıyla elektrik ve buhar elde edilmektedir. Yakılma esnasında hava kirliliği oluşacağından hava kirliliğini önleyecek düzeneğin kurulması gereklidir (Anonymous 1999; Tunç 2009).

3.1.7.4. Hammaddesel değerlendirme

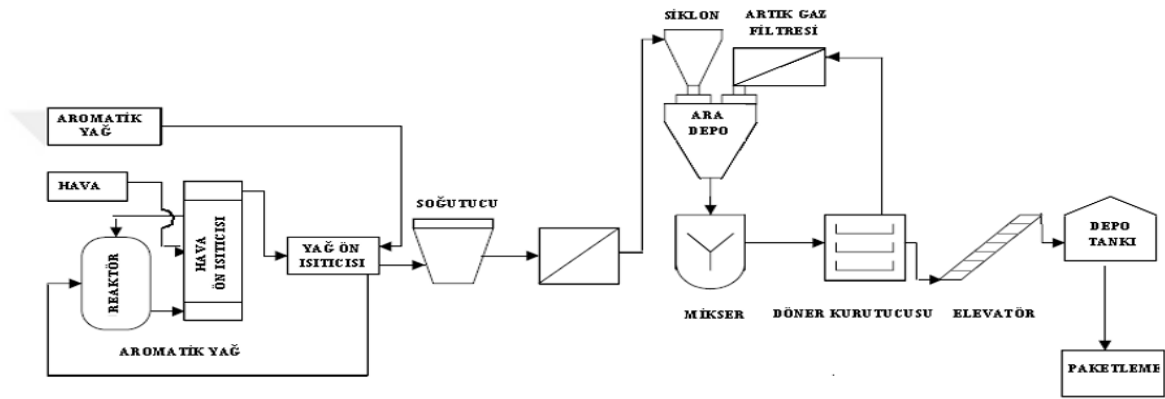
Lastiklerin üretiminde kullanılan maddeler dayanıklılık sağlayabilmeleri için yüksek dirence sahip olacak şekilde dizayn edilmektedir. Ömrünü tamamlamış lastikler eskisi gibi kullanılamayacak duruma geldiklerinde, parçalama ya da granül işlemlerinden sonra pirolizle yeni ürünlerin üretilebilmeleri için hammadde sağlanırlar (Pangaliyev 2014). Lastikler amacına uygun değerlendirilebilmeleri için uygun parçalara ayrılmaktadır. Bundan dolayı önce içindeki çelik çıkartılarak dilimleyici vasıtasıyla kırıntı haline getirilir (Acar Bozkurt 2011; Acevedo et al. 2015). Piroliz, oksijen olmayan ortamlarda ve yüksek sıcaklıklarda sıcaklık vasıtasıyla organik malzemelerin ayrışma işlemidir. Piroliz sayesinde farklı hallerde farklı ürünler oluşmaktadır. Gaz hali buhar olarak pirolizin reaktöründe yakıt olarak kullanılır. Sıvı hali ise pirolitik yağdır ve yakıt olarak ve çeşitli işlemlerden geçtikten sonra otomobil yakıtı olarak da kullanılabilir. Karbon karasıya katı halini oluşturmaktadır. Atık Lastik Yönetim Konseyi'nde yapılan çalışmada standart bir otomobil lastiğinin yapısında ortalama 3 kg karbon karası 4 lt yağ 1,5 kg gaz ve 1 kg çelik ve kül vardır. Oluşan ürünlerin yapısında piroliz ünitesindeki sıcaklık etkilidir. Yüksek sıcaklıklarda gaz düşük sıcaklıklarda ise sıvı ürünler oluşur (Myhre 2012).

3.1.8. Siyah karbon

Günümüzdeki siyah karbon türlerinin gelişimi bundan 3500 yıl önce Çin'de üretilmesiyle ortaya çıkmıştır. İnceliği çoktur ve siyah renktedir. Atmosferde bulunan karbonlara genel olarak siyah karbon denilir. Hidrokarbonların eksik yanmasıyla elde edilir (Anonim 2004). Karbon karası çeşitli sektörlerde ham madde ve katkı olarak kullanılmaktadır. Farklı ürünlerde farklı miktarlarda kullanıldığında ürüne dayanıklılık ve renk verir (Çetişli 2013). Lastiğin yaklaşık %25 i karbon karasından oluşmaktadır ve

3. MATERYAL ve YÖNTEM

lastiğe direnç katmaktadır. Direnç katma özelliği 1910'da İngiltere'de bulunmuştur (Megep 2008). Siyah karbon üretiminde hammadde olarak petrol yağları ve gazları, doğal gaz ve benzin, fueloil veya kalıntı petrol yağları kullanılmaktadır. Üretim, bu hammaddelerin yeterli miktardaki havayla farklı yöntemler kullanılarak yakılmaları suretiyle yapılmaktadır. Siyah karbon üretimi farklı yöntemlerle yapılmaktadır (Özbaş 2004). En yaygın yöntem fırınlama yöntemidir. Genel olarak sisteme doğal gaz veya yağın girişiyle ve sıcaklıkla buluşup piroliz edilince karbon karası ve gaz elde edilir. Bu işlem ayrıntılı bir şekilde Şekil 3.6 da verilmiştir.



Şekil 3.6. Siyah karbon üretim aşamaları (Anonim 2001).

Reaktörlerdeki yakma bölmesinde 1100 ile 1650 C° arasındaki sıcaklıkla 0,07 ile 0,2 kg/cm² arasında düşük sayılacak bir basınçla ve mikro saniyeler süren reaksiyonlarla gerçekleşir. Reaktörlerden çıkan siyah karbon ve sıcak yanma gazları (hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit) ısı değiştiricilerden geçerek filtreden geçerler ve filtrasyon sonucu siyah karbon oluşur. Siyah karbon çok ince ve toz halindedir. Boyutlar yaklaşık 18-85 nm'dir. Daha rahat taşınması için pelletleme adı verilen işlem uygulanmaktadır. Pelletleme, ince boyuttaki siyah karbonun pelletizör ekipmanında bağlayıcı bir madde olan melas ve su yardımıyla daha büyük tanelere getirmesidir (Anonim 2001; Özbaş 2004; Parkash 2010). Daha birçok üretim yöntemi olmasına rağmen piroliz yöntemiyle üretilenler çok daha ekonomiktir (Çetişli 2013). Siyah karbonlar kıvamına göre sert ve yumuşak olarak ikiye ayrılmaktadır. Sert türler HAF (High Abrasion Furnace-Yüksek aşınma fırını) ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace- Orta Seviye Süper Aşınım) yumuşaklar ise GPF (General Purpose Furnace) (Genel Amaçlı Fırın) FEF (Fast Extrusion Furnace-Hızlı Gönderme Fırını) diye gruplandırılmıştır.

HAF (High Abrasion Furnace) (Yüksek Aşınma Fırın) özellikleri:

- Aşınmaya karşı dayanıklılığı iyidir.
- Tane yapısı normal ve küçüktür.
- Bükülme gerilmelerine ve deformasyona karşı çok iyi mukavemet vermekle beraber kauçuğun gerilmelere ve kopmalara karşı direncini artırıp ısıyı biriktirmez.

ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace) (Orta Seviye Süper Aşınma Fırın) özellikleri:

- Aşınmaya karşı oldukça iyi direnç gösterir.
- Normal yapılı ve tanecikleri oldukça küçüktür.
- Kauçuktaki gerilim ve kopma dirençlerini yükseltir.

FEF (Fast Extrusion Furnace) (Hızlı Gönderme Fırın) özellikleri:

- Aşınmaya dayanıklı olup hızlı bir şekillenme sağlar.
- Yapısı bakımından normal olup ve tanecikleri orta büyüklüktedir.

GPF (General Purpose Furnace) (Genel Amaçlı Fırın) özellikleri:

- Genel amaçlar için kullanılır.
- Tane boyutları normal olup işlenebilirliği kolaydır.(Anonim 2001a)

ASTM'ye (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu) göre tanecik boyutuna göre siyah karbonlar sınıflandırılabilir. Çizelge 3.2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. Siyah karbonun tanecik boyutuna göre sınıflandırılması (Kızıлтаş 1999).

Siyah Karbon Tipi	Partikül Büyüklüğü (nμ)	Numaralandırma
SAF	11–19	110
ISAF	20–25	220
HAF	26–30	330
FEF	40–48	550
GPF	49–60	660
SRF	61–100	770

Siyah karbonun kauçukla karıştırıldığında performans ömrünü uzatmak, özellikle deformasyonlara karşı mukavemet sağlamak, ayrıca güneş ışığının kötü etkilerinden korunmak gibi özellikleri vardır. Siyah karbon, kopmaya karşı malzemede sertlik gösterir. Yalnız malzemelerde aşırı sertlik de istenilen bir durum değildir. Siyah karbonun bu özelliklerinden dolayı lastiklerde %25 oranında kullanılmaktadır. (Kızıлтаş 1999). Lastiklerde siyah karbon kullanımında kullanılmadığına göre 40 kat fazla yol alır (Popovic 2000). Siyah karbon lastik üretiminin dışında kablolarda, konvyor bantlarda, siyah poşetlerde ve daha birçok sektörde kullanılır (Çetişli 2013).

3.1.9. Zirkonyum dioksit

Zirkonyum, Arapçada zargon kelimesinden türetilmiş olup etimolojik olarak da altın renkli manasına gelmektedir. Ayrıca Arapça ya da Farsçadan zar (altın) ve gun (Renk) kelimelerinin birleşimiyle literatüre girmişlerdir (Piconi 1999). Zirkonyum, atom numarası 40, ağırlığı 91,22, sembolü Zr olan parlak ve korozyonlara karşı çok iyi etki gösteren metal geçiş elementidir (Stevens and Hennike 1992). Zirkonyum dioksit 1789 yılında Martin Heinrich Klaproth tarafından bulunmuş ve 1824 yılında İsviçreli kimyager Jöns Jakob Berzelius tarafından potasyum ile beraber işlenip korunmuştur (Stevens and Hennike 1992; Oh and Shen 2003; Chevalier 2006). Zirkonyum dioksite zirkonya da denilmektedir ve zirkonyumun beyaz kristal oksidi şeklindedir. Ham olarak zirkonyum oksit doğada bulunmamakla beraber baddeleyit ve zirkon ($ZrSiO_4$) minerallerinin içinde yer almaktadır (Piconni and Maccauro 1999; Lindemann 2000). Bir çok alanda kullanılmakla beraber ateşe dayanıklı ve izolasyon malzemelerde, kesici alet yapımında metal şekillendirmelerinde ve yakıt hücrelerinde kullanılır (Piconni ve Maccauro 1999). Genel olarak dişçilikte yapılan kompozit malzemelerde ve implant uygulamalarında kullanılmaktadır (Vagkopoulou et al. 2009).

3.2. Yöntem

3.2.1. Piroliz

Piroliz (Pyrolysis) etimolojik anlamda Yunancadan gelmiş olup ayrı olarak incelendiğinde pyr = ateş ve olysis = ortaya çıkmak manasına gelmektedir. Piroliz, biokütlenin oksijensiz ortamda ve yüksek ısı etkisiyle organik moleküllerin birbirinden ayrılma işlemidir. Kimyasal bağlar, oksijensiz ortamda ve sıcaklık etkisiyle bozulurlar (Üçgül ve Akgül 2010). Piroliz sayesinde yararlı enerji (yakıt) ve kimyasal maddelerin üretimi yapılabilir. Piroliz gazlaştırma ve yakma işlemlerinin ilk aşamasıdır. Genellikle biokütlenin pirolizi genellikle 350-550 °C dereceler arasında çalıştırılıp ve 700 °C kadar da çıktığı da görülürken lastiklerin pirolizleri ise genellikle, 250-500 °C sıcaklık aralığında çalıştırılıp bazen 900 °C'ye kadar çıktığı bilinmektedir (Prakash and Karunanithi 2008; Antoniou 2013). Pirolizde, hammaddenin sıcaklık artışıyla beraber biyokütlenin ayrışması başlar. Sıcaklıkla beraber hammaddeden ayrılan su buharı reaktörden dışarı çıkar ve geriye katı kalıntı ve gaz kalır. Gazın katı kalıntıdan ayrılabilmesi için soğutulur reaktörden çıkarılır. Reaktör çıkartılan gazdan yoğunlaştırılabilenlerden biyoyağ ve piroliz yağı elde edilirken yoğunlaşmayan gazlar sistemde yakıt olarak kullanılır. Aynı şekilde, katı kalıntılar da piroliz sisteminde yakıt olarak kullanılabilir gibi ticari ürün olarak da satılabilmektedir (Basu 2010).

İnsanoğlunun pirolizle ilgili işlemleri eskiden beri kullanmaktadır. Tesadüfen oluşan en eski örnek, yaklaşık 38.000 yıl önce yangından dolayı oluşan odun kömürüyle mağara duvarlarına yapılan resimlerdir. Bilinçli yapılan ilk örneğe Tunç Çağından itibaren metali eritmek için üretilen odun kömürü üretilmiştir. Günümüzde de bu kömür metal sanayinde kullanılmaktadır. Petrokimya sanayisinin kurulumundan önce, odun kömürünün pirolizinden elde edilen ürünler endüstriyel ve tıbbi alanlarda kaynak olarak kullanılmaktaydı (Bridgwater 2000; Antal and Gronli 2003). Piroliz uygulaması antik çağlarda Amazon ormanlarında verimsiz topraklarda biyokömür oluşturarak, toprağın verimini artırmak için kullanılmıştır. Biyokömürü oluşturmak için ateş yakarlardı ve yakıt yeterince sıcak olduğunda oksijenle temasını kesmek için ateşi toprakla kapatıyorlardı. Yüksek sıcaklık yakıtın parçalanmasını sağlarken oksijen olmadığı için kül değil biyokömür kalıyordu. Daha yakın zamanlarda birinci ve ikinci

dünya savaşı esnasında fosil yakıtların azlığından ve fosil yakıtlara olan ihtiyaçtan dolayı odun atıklarının hammadde olarak kullanıp piroliz yöntemi ile fosil yakıt üretilmiştir (Tiilikkala et al. 2010).

3.2.1.1. Piroliz türleri

Piroliz işlemleri ısıtma hızı, biokütlenin alıkonma süresi ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak ayrılır. Piroliz işlemleri Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi üçe ayrılır, bunlar yavaş piroliz (geleneksel), flaş piroliz ve hızlı pirolizdir. Her piroliz sonucunda katı, sıvı ve gaz ürün çıkar ama çıkan ürün miktarı olarak birbirinden farklıdır. (Demirbas 2009; Anonymous 2013; Chhiti and Kemiha 2013). Her piroliz türünün ısıtma hızı, sıcaklık, biyokütle boyutu ve zaman değerleri değişkenlik gösterir.

Çizelge 3.3. Piroliz türleri (Demirbas 2009).

Piroliz Türü	Isıtma Hızı	Sıcaklık	Biyokütle Boyutu	Zaman (S)
Yavaş piroliz	0,01-01	277-627	5.Eki	300-3600
Hızlı piroliz	10-200	577-977	<1	0.5-10
Flaş piroliz	>1000	777-1.027	<0.2	<0.5

3.2.1.2. Pirolizi etkileyen faktörler

Pirolizin başarıya ulaşmasını ve elde edilen ürünlerden en yüksek verimin alınmasında, uygun yakıt özelliklerinin (biyokütlenin organik-inorganik yapısı, nem ve kül miktarı, gözenekliliği, uçucu bileşen miktarı, ısıl değeri, sabit karbon/uçucu madde oranı, selüloz/lignin oranı) yanı sıra, belirli faktörlerin de büyük etkisi bulunmaktadır. Bunlar; ısıtma hızı, sıcaklık, parçacık boyutu, basınç, katalizör, piroliz ortamı, sürükleyici gaz akış hızı ve reaksiyon süresidir. Bu faktörlerin etkileri birçok çalışmaya konu olmuş ve yapılan deneylerle etkileri belirlenmiştir (McKendry 2002).

a. Sıcaklık

Sıcaklık piroliz işlemi ürün verimi ve bileşimi yönünden etkileyen en önemli faktördür. Piroliz işleminde sıcaklık değeri arttıkça sıvı ve gaz ürün oranında artış

görülürken, katı ürün oranında azalma görülür. Piroliz işlemi, sıcaklık değerlerine göre üç bölüm olarak değerlendirilebilir; 1. Safhada 100-300°C arasındayken ve katı ürünler daha fazla elde edilir. 2. safhada 500°C'ye kadar sıcaklığın yükseldiği aşamadır bu aşamada sıvı ürünler daha fazla elde edilir. 3. Safha ise 700 °C 'den yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında daha fazla gaz elde edilir. Bu gazlar çoğunlukla H₂, CO ve CH₄ olarak elde edilir (Probstein and Hiks 1982; Basu 2010). Atık lastik pirolizinde yaklaşık 250°C üstündeki sıcaklıkta daha fazla sıvı ve gaz ürünler gözlenirken, 400°C sıcaklık üstüne çıkıldığı zaman daha fazla gaz ürünler elde edilir (Antoniou and Zabaniotou 2013).

b. Isıtma Hızı

Isıtma hızı piroliz işlemi yapılacak olan yakıtın sıcaklık değerlerinin artırılma hızıdır. Pirolizde ısıtma hızı 1-10 C°/dk aralığında olması yavaş piroliz 102 °C/s 'in üzerinde olan işlemler hızlı piroliz olarak iki farklı şekilde adlandırılır. Hızlı piroliz işlemi saniyelerce sürerken yavaş piroliz işlemi saatlerce sürebilir. Isıtma hızı arttıkça yakıttan elde edilen sıvı ve gaz ürün miktarı da artmaktadır. Yalnız bu etki daha çok düşük sıcaklıklarda görülürken yüksek sıcaklıklarda fazla bir etkisi görülmemektedir (Uzun vd. 2006; Basu 2010).

c. Parçacık Boyutu

Piroliz işleminde kullanılan parçacıkların boyutu işlemin gerçekleşmesinde büyük etki gösterir. Parçacık boyutunun genellikle 2 mm altında olması istenir. Parçacık boyutu arttıkça yakıtta ısı transferi zorlaşır ve gaz formunda ürün elde edilen ürün oranı azalırken katı ürünler artmaktadır. Kömür taneciklerinde yapılan çalışmalarda elde edilen verilere göre 50 mikron altında tanecik büyüklüğünün verime etkisi olmadığı görülmüştür (Probstein et al. 1982). Atık lastik pirolizinde hammadde partikül boyutunun en son elde ettiğimiz ürüne karşı etkisinin olmadığı saptanmıştır. Fakat yüksek sıcaklıklarda partikül boyutu arttıkça sıvı ürün verimi artarken, katı ürün verimi sabit kalmaktadır (Antoniou ve Zabaniotou, 2013).

d. Piroliz ortamı

Pirolizin gerçekleştiği ortam ürün dağılımı ve yapısını etkileyen diğer bir parametredir. Piroliz, sürükleyici gaz, hidrojen ve su buharı gibi ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Sürükleyici gaz olarak N₂, He, Ar gibi gazlar kullanılmaktadır. Sürükleyici gaz olan yerlerde normal ortamlara göre parçalanma polimerleşme ve yoğunlaşma gibi aşamaları atladığı için sıvı ürün daha fazla açığa çıkmaktadır (Özyurtkan ve diğ., 2008; Basu, 2010).

e. Reaksiyon süresi

Literatürde reaksiyon süresinin de piroliz ürün çeşidinde etkisi olabileceği belirlenmiştir. Rahman ve arkadaşları tarafından pirolizdeki reaksiyon sıcaklığı ve sürelerinin etkilerini belirlemek için dört farklı katı atığa uygulanan piroliz, farklı reaksiyon sıcaklıklarında ve sürelerinde yapılmıştır. Yapılan pirolizlerden hareketle 600°C'de maksimum sıvı ürün verimine ulaşılmıştır. Bu sıcaklıkta da reaksiyon süresinin 35 dakikadan 5 dakikaya indirilmesi, sıvı ürün verimini %16'dan %27,6'ya yükselttiği bulunmuştur (Rahman et al. 2001).

f. Basınç

Basınç miktarı, oluşan uçucu madde miktarı etki etmektedir. Basınç düzeyinin yüksek olduğu durumlarda parçalanmalar hızlı oluşmakta ve basit hidrokarbonlar artmaktayken, basınç düzeyinin düşük olduğu durumlarda katran ve hafif yağların oluşumunda artış gözlemlenmektedir. Basınç düzeyinin etkisini görebilmemiz için sıcaklığın 350°C ve üzeri olması gerekmektedir (Bridgwater 2006).

g. Katalizör

Literatür çalışmalarında pirolizde kullanılacak olan katalizörün türü, yüzey alanı, gözenek boyutu ve asitliliğine göre oluşan ürün verimlerinin değiştiği yer almaktadır. Örneğin; zeolit katalizörleri varlığında piroliz buharları katalitik olarak parçalandığında,

benzin, dizel yakıt ve diğer hidrokarbon ürünler elde edilmektedir (Williams and Chishti 2000).

3.2.2. Bitüm modifikasyonu

Geleneksel bitümlerin, trafik ve iklim koşulları çerçevesinde asfaltlarda kullanımı, yapışma ve mekanik özellikler açısından yeterli düzeydedir. Fakat zamanla değişen trafik ve iklim şartları kaplama üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır. Bundan dolayı, üstyapı bozulmaları beklenilenden daha erken zamanda gerçekleşir ve bakım maliyetleri artar (Hunter et al. 2015). Bundan dolayı kaplamanın performansını yükseltmek amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine karıştırılmasına modifiye bitüm, karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılmasıyla modifiye karışım elde edilmektedir. Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme farklı deneyler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenerek değerlendirilmesi yapılmaktadır. Fakat bitümün modifiyeleştirilmesi, özelliklerinin tespiti, taşınması ve depolanması gibi problemler açığa çıkmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesine ek olarak ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi problemlerle beraber karışıma deney yapılarak özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha doğru sonuçlar yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiyesi daha kolay olmaktadır (Ilıcalı 2001).

3.2.2.1. Bitüm modifikasyonunun amaçları

Bitüm, termoplastik özelliği dolayısıyla değişken koşulları altında değişken davranışlar sergiler. Sıcakta akışkan ve yumuşak olan bitüm, soğukta gevrek durumdadır. Ayrıca bitüm, üstyapının viskoelastik davranışından sorumlu olduğu için, trafik etkisiyle üstyapıda meydana gelecek deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlaklar gibi bozulmalara karşı, üstyapının göstereceği direnci belirler. Üstyapının performansını etkileyen en önemli unsurlardan olan bozulmalar, en iyi ihtimalle, öngörülenden daha erken zamanda bakım – onarım gerektirdiği için maliyetleri artırır. Maliyeti azaltmanın

ve üstyapının performansını mümkün olduğunca iyileştirmek için esnek üstyapıların temel malzemelerinden olan bitümün, çeşitli katkıları kullanılarak modifikasyonu sağlanmaktadır. Bitüm modifikasyonunun temel amacı olarak nitelendirilebilecek yüksek sıcaklık deformasyonlarına karşı üstyapı direncinin artırılması gösterilebilir. Bitüm rijitliği arttıkça asfaltın dinamik rijitliği de artar. Böylece esnek üstyapının homojen yük yayma kabiliyeti ve yapısal gücü artarken öngörülen hizmet ömründe de artış sağlanır (Hunter et al. 2015).

Orhan (2012), bitüm modifikasyonunun genel amaçlarını aşağıdaki şekilde sıralamıştır:

- Üstyapıda meydana gelen çatlakların neden olduğu kalıcı deformasyonların önüne geçebilmek için adına düşük sıcaklıklarda kullanılmak üzere daha esnek karışımlar elde etmek,
- Üstyapıda tekerlek izi dayanımını artırmak için sıcaklıkların fazla olduğu bölgelerde kullanılmak üzere daha sert karışımlar elde etmek,
- İmalat sıcaklıklarında kıvamı azaltmak,
- Bitümün işlenebilirliğini ve bitümlü sıcak karışımın sıkışmasını yükseltmek,
- Bitümlü sıcak karışımın dayanımını ve trafik yükleri altında üstyapıda meydana gelen çatlaklara karşı üstyapının direnci artırmak,
- Aşınmaya karşı bitümlü sıcak karışımın gösterdiği dayanımı artırmak ve agregaların bitümden soyulmasını engellemek,
- Üstyapının soğuk iklimli bölgelerde soğuktan dolayı kaplama tabakasında meydana gelen termal çatlakların oluşmasını engellemek,
- Tekrarlı yükler altında, üstyapıda sıklıkla görülen çatlaklara karşı üstyapının gösterdiği direnci artırmak,
- Asfalt betonunu daha kaliteli hale getirmek,
- Yaşlanmadan dolayı bitümlü bağlayıcıda meydana gelen değişimleri tersine çevirmek,
- Alışılmadık agregaların kullanımını sağlamak,
- Bitümlü bağlayıcının ömrünün uzamasını sağlamak,
- Agrega yüzeyindeki asfalt tabakasının kalınlığını artırmak,
- Bitüm ve agrega arasındaki yapışmayı artırarak soyulmayı önlemek,

- Üstyapıda meydana gelen yüzey kusurlarından olan ve üstyapının sürtünme katsayısının düşmesiyle sonuçlanan kismayı azaltmak,
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak,
- Yakıt dökülmelerine karşı direnci yükseltmek,
- Bitümlü bağlayıcının yaşlanmaya karşı dayanımını yükseltmek,
- Kaplama tabakalarının kalınlığını azaltmak,
- Üstyapının hizmet edeceği süre boyunca maliyeti azaltmak,
- Kaplamanın performansını iyileştirmek,

Son yıllarda bitüm modifikasyonu ile ilgili çalışmalara bakıldığında, bitümün özellikle kendisiyle aynı davranışları sergileyen materyallerle modifiye edilmesinin, bu amaçların hepsine olmasa bile, büyük çoğunluğuna hizmet ettiği belirlenebilir.

3.2.2.2. Bitüm modifikasyonunda aranan özellikler

Bitümün modifiye edilmesinde belirlenecek katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra elde edilen modifiye bitümün, özellikle bazı beklentileri karşılaması gerekir. İlk beklentimiz, modifiye bitümün modifikasyonla kazandığı özelliklerinin depolanmasından karıştırılmasına ve yola uygulanması süreçlerinde devamlı olarak korumasıdır. Ayrıca bu aşamalarda fiziksel ve kimyasal açıdan herhangi bir değişikliğe uğramaması gereklidir. Modifiye bitümün kolaylıkla işlenebilir ve uygulama sıcaklıklarında agregayı sarabilecek akışkanlıkta olması istenir (Ilıcalı 2001). Bu nedenle, bitüm modifikasyonu yapılan çalışmalarda öncelikli hedef, bu beklentilerin mümkün olan en üst düzeyde karşılanmasını sağlamaktır.

3.2.2.3. Bitümün modifikasyonu için kullanılan katkı ve özellikleri

Bitümün modifikasyonu için birçok katkı kullanılmış ve katkı sayesinde bitümde farklı etkiler gözlenmiştir. Bitümde kullanılan katkı maddeleri ve bitümün kıvamında meydana getirdiği değişim Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bitüm modifiyesinde 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 -Polipropilen -EVA, Etil-Vinil-Asetat -PVC, Polivinil Klorid -Plastik ve Kauçuk Polimerlerin Karışımı	Adezyon
Plastik		Sertleştirme
Bileşim		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

3.2.2.4. Modifikasyon yöntemi ve yapılan deneyler

Deneyisel çalışmalarda kullanılan 70/100 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı, Erzurum Karayolları Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir. Bitümde kullanılan katkıları ise Zirkonyum Dioksit ve Siyah Karbondur. Zirkonyum Dioksit internet üzerinden Siyah Karbon ise Era Çevre Teknolojileri A.Ş'nin Erzincan ÖTL Geri Kazanım Ve Elektrik Üretimi Tesisi'nden temin edilmiştir. Yaklaşık olarak 150 C°'ye kadar ısıtılan bitüm 30 dakika 5000 devir/dakika olacak şekilde ağırlıkça %1 Zirkonyum Dioksit %1 Siyah Karbon (%1+%1), %2 Zirkonyum Dioksit %2 Siyah Karbon (%2+%2), %3 Zirkonyum Dioksit %3 Siyah Karbon (%3+%3), katılarak 3 farklı numune oluşturulmuştur. Nano boyutdaki Zirkonyum Dioksit Şekil 3.7'de Nano

3. MATERYAL ve YÖNTEM

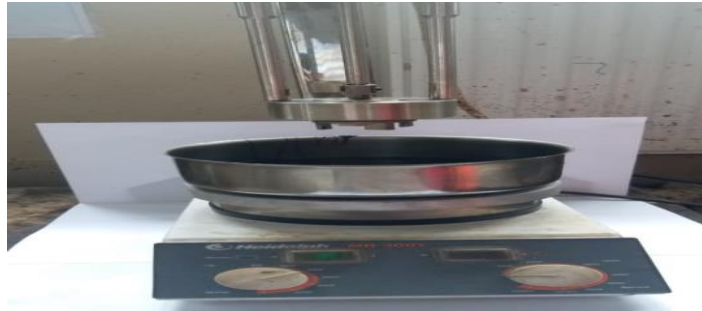
boyuttaki Siyah Karbon Şekil 3.8’de katkının modifiye bitüm içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan yüksek devirle karıştırıcı ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Zirkonyum Dioksit.



Şekil 3.8. Siyah Karbon.



Şekil 3.9. Yüksek devirli karıştırıcı.

Tez çalışmasında kullanılmadan önce bitümlü bağlayıcının sahip olduğu özelliklerin belirlenebilmesi adına penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası deneyleri yapılmıştır. Bunlara ek olarak performansının belirlenebilmesi için bitümlü bağlayıcı, dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV),

dinamik kesme reometresi (DSR) ve eğilen kiriş reometresi (BBR) deneylerine tabi tutulmuştur.

3.2.3. Bitüm sınıflandırma sistemleri

Bu başlık altında, bitüm sınıflandırma sistemlerinin tarihçesi, geleneksel bitüm sınıflandırma sistemleri ve superpave bağlayıcı sınıflandırma sistemi incelenerek superpave sistemi ve geleneksel bitüm sistemi karşılaştırılarak superpave sisteminin üstünlükleri anlatılacaktır.

3.2.3.1. Geleneksel bitüm sınıflandırma sistemleri

Bitüm sınıflandırmasının ortaya çıktığı ilk zamanlarda, ileri düzeyde bilimsel deney yöntemlerinin olmaması ve bitümlü bağlayıcıların fazlasıyla karmaşık bir yapıda olması, bitümle ilgili şartnamelerin sadece penetrasyon, viskozite gibi fiziksel özelliklere bağlı olmasından dolayı ve yıllarca boyunca bu şartnamelerle sınıflandırma yapılmasına neden olmuştur (Federal Highway Administration 2000; Sağlık 2009). Bu temel iki deneye dayanan sınıflandırma yöntemleri anlatılmıştır.

a. Penetrasyon sınıflandırma sistemi

Bu sınıflandırma sistemi, 1900'lü yılların başlarında tam katı ve tam sıvı olmayan yani yarı katı bitümlerin kıvamını bulmak için tayini için geliştirilmiştir. Penetrasyon sınıflandırma sistemi, bitümün özelliklerini aşağıda verilen deneylerle belirler:

- Penetrasyon
- Parlama noktası sıcaklığı
- 25 °C'de duktilite
- Trikloretilende çözünürlük
- İnce film halinde ısıtma kaybı (Bitümün sıcak agrega ile karıştırılması esnasında ortaya çıkan kısa süreli yaşlanmanın etkilerini açıklar.)
- Kalıcı penetrasyon

Penetrasyon sınıflandırma sistemi, bitümün viskozitesi ne kadar yüksekse penetrasyon iğnesinin bitüme batmasının da o kadar az olacağını varsayar. Yani penetrasyonla viskozite ters orantılıdır. Bu penetrasyon derinliği, ampirik olarak (kabaca da olsa) bitümün performansı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, sıcak iklim koşullarında sert penetrasyonlar kullanılırken soğuk iklimlerde yüksek penetrasyonlu bitümler kullanılır.

Penetrasyon sınıflandırma sistemi adına, deneyin 25 °C’de yapılması ve bu sıcaklığın kaplama sıcaklığına yakın olması bir avantajdır. Ayrıca bu sınıflandırma sistemi viskozite deneyinde uygulanan 60 °C sıcaklık 25 °C sıcaklığa göre, yüksek sıcaklıklardaki performansına dair daha iyi fikirler verir. Penetrasyon vizkoziteye göre daha düşük sıcaklıklarda daha sağlıklı bilgiler verebilir ve bitümlü bağlayıcı özellikleri ile daha iyi bir ilişki sunabilir.

Avantaj olarak deneyin hızlı sonuç alınabilmesi ve ucuz olması, sahada uygulanabilirliğinin gayet kolay olması verilebilirken, sistemin ampirik olması ve viskozite gibi herhangi bir temel mühendislik parametresini ölçmemesi, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları hakkında fikir alamamamız en büyük dezavantajları olarak gösterilir (Anonymous 2019).

b. Viskozite sınıflandırma sistemi

Viskozite deneyi sonuçlarını baz alan bu sınıflandırma sistemi, 1960’lı yılların başlarında geliştirilmiştir. Bu bilimsel deney, penetrasyon deneyinin yerini almıştır. Viskozite sınıflandırma sistemi, bitümün özelliklerini aşağıda verilen deneylerle belirler:

- 60 °C’de viskozite
- 135 °C’de viskozite
- 25 °C’de 5 saniye boyunca uygulanan 100 gr’lık iğnenin penetrasyon derinliği
- Parlama noktası sıcaklığı
- 25 °C’de duktilite

- Trikloretilende çözünürlük
- İnce film halinde ısıtma kaybı (Bitümün sıcak agrega ile karıştırılması esnasında ortaya çıkan kısa süreli yaşlanmanın etkilerini açıklar.)

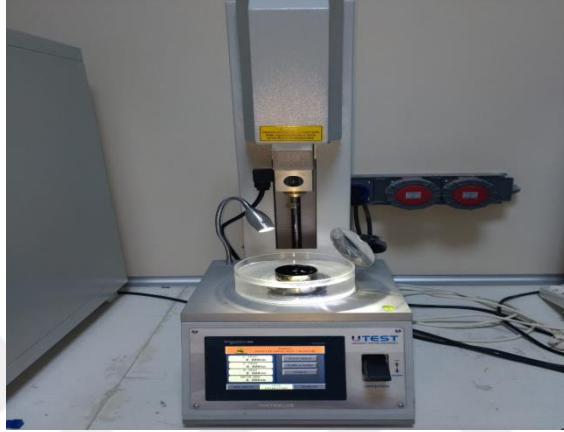
Viskozite sınıflandırması, geleneksel bitümlü bağlayıcı numuneleri ve yaşlanmış bitümlü bağlayıcı üzerinde yapılabilir. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcı ile gerçekleştirilen viskozite sınıflandırması, AR sınıflandırması olarak adlandırılır ve dönel ince film halinde ısıtma deneyinden (RTFOT) elde edilen bağlayıcının viskozitesine dayanır. Orijinal bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerinde yapılan viskozite sınıflandırması ise AC sınıflandırması adını alır ve bitümlü sıcak karışım üretiminden önce bağlayıcının sahip olduğu özellikleri karakterize eder. AR sınıflandırma sistemi, bağlayıcı özelliklerinde bitümlü sıcak karışım üretimi işleminden sonra meydana gelen değişimleri simüle ettiği için bağlayıcının üstyapıdaki davranışını daha iyi temsil eder.

Penetrasyon derinliğinin aksine, viskozitenin temel bir mühendislik parametresi olması, bu sistemin, penetrasyon sınıflandırma sistemine göre üstün bir yönü olarak kabul edilir. Penetrasyon derinliği tek bir sıcaklık değerinde (25 °C) ölçülürken viskozite, 25°C 60°C 135°C üç farklı sıcaklıkta ölçülür; bu da penetrasyona göre sıcaklık hassasiyetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi açısından daha sağlıklıdır. Deney ekipmanlarına ve standardına erişimin kolay olması da viskozite sınıflandırma sistemi adına bir avantajdır. Bu sistemin dezavantajları arasında deneyin penetrasyon deneyine göre daha uzun sürmesi ve daha pahalı olması da sayılabilir (Anonymous 2019).

3.2.4. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi dereceli veya oksitlendirilmiş bitümün kıvamı penetrasyon deneyi ile ölçülmektedir. Bu deneyde, belirli boyutlara sahip bir iğnenin, belirli bir yük (100 g) ve sıcaklık (25 C°) altında, belirli bir süre (5 saniye) boyunca bitüm numunesi içerisine batırılır ve iğnenin desimilimetre, (0.1 mm) cinsinden ne kadar batıyorsa o batma derinliğine penetrasyon değeri denir. Dolayısıyla, bitüm sertleştikçe iğnenin penetrasyonu azalacaktır (İlcalı 2001). Deney yapılırken hassas davranılması önemlidir. Çünkü çok ufak bir sapma, deney sonuçlarında büyük farklılıklara sebep olabilir. En

çok yapılan hatalar numune hazırlanırken deney aleti ve iğnenin bakımının yapılmaması ve sıcaklık ve sürenin deney standartlarından farklı oluşudur. Deney sıcaklığı oldukça önemli olup, ± 0.1 C° hassasiyetinde kontrol edilmesi gerekli olup, iğnelerin düzgün oluşu, duruş bozukluğu olmaması ve temizliği düzenli olarak kontrol edilmelidir (İsfalt 2001). Penetrasyon yapılan deneylerde deney aleti otomatik olup Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Penetrasyon deney aleti.

3.2.5. Yumuşama deneyi

Yumuşama noktasının, penetrasyon gibi bitümlü bağlayıcının kıvamlılığını belirlemede yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir (Hunter et al. 2015). TS EN 1427 standartlarına göre deney halkalarına yapışmayı önleyici madde sürülüp bitüm halkaların içine dökülür ve 30 dk ve 4 saat arasında bekletilir. Taşan bitüm sıcak bir bıçak yardımıyla tıraşlanıp yüzeyi düzgün hale getirilir. Deneyde 28 °C ile 80 °C arasındaki yumuşama noktalarını bulmak için su kullanılır. Suyun içinde yabancı madde bulunmamasına dikkat edilmelidir. Termometre ise 0.2 °C hassasiyetle okuma yapmalıdır ve deneye başlarken suyun sıcaklığı (5 ± 1) °C ile başlayıp en az 15 dakika ve en fazla 20 dakika olacak şekilde sabitlenmesi gereklidir. Sonradan maşa yardımıyla demir bilyeler halkaya yerleştirilmelidir. Beher içerisindeki su manyetik karıştırıcıyla karıştırılır. Sıcaklık değişimi dakikada 5 °C artacak şekilde ayarlanır. Sıcaklık arttıkça bitümlü bağlayıcı yumuşayıp bilyelerle birlikte deney düzeneğinin tabanına doğru iner. Bağlayıcının düzene tabanına değdiği anda okunan sıcaklık, o bağlayıcının yumuşama noktası değeridir. 80 °C'nin altında yumuşayan bitümlerde, iki numunenin sıcaklıkları

arasındaki fark 1 °C'iken 80 °C'nin üzerinde olan numuneler için ise bu farkın en fazla 2 °C olması gerekir. Bu şartların sağlanmaması durumunda, deney tekrarlanmalıdır. Yumuşama noktası deney aleti Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Yumuşama deney aleti

3.2.6. Parlama noktası deneyi

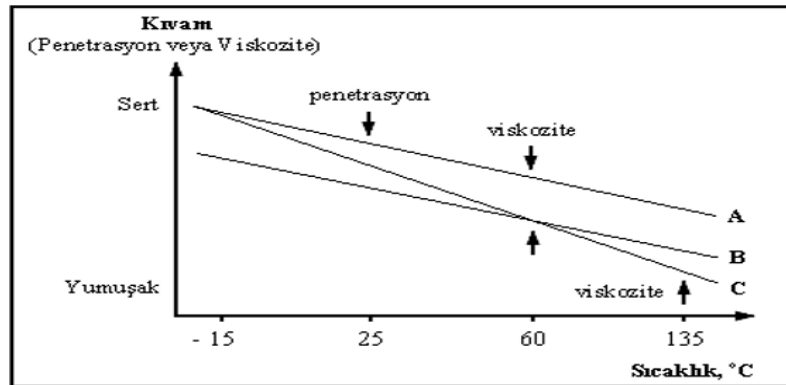
Parlama noktası asfalt çimentosunun ısındığı zaman diliminde, buharın ateşle temasında geçici süreliğine parladığı, ancak yanmadığı en düşük sıcaklıktır. Parlama noktası deneyi genelde, yol inşaatı uygulama zamanında asfaltın hangi ısıda alevlenme ve yanma tehlikesinin ne zaman oluşacağını anı belirlemek için yapılmaktadır. Parlama noktası tayini için asfalt çimentosu küçük bir kaba doldurulmaktadır. İlk aşamada numune dakikada 14-17 °C olarak belirli sıcaklığa kadar ısıtılıyor, ikinci aşamada ise parlama noktası ısıtma hızı dakikada 5-6 °C kadar düşürülerek numune alev asfaltın üzerine geçirilir. Dolayısıyla numunenin buharlandığı ve ateşin tuttuğu an parlama noktası değeri olarak belirlenir. Şekil 3.12'de parlama deney aleti gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Parlama deney aleti.

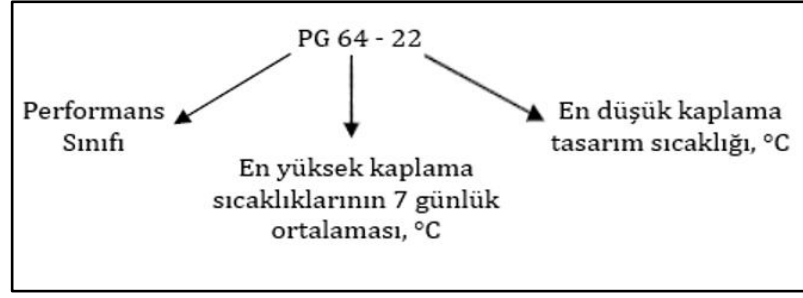
3.2.7. Superpave bağlayıcı sınıflandırma sistemi ve üstünlükleri

Dünyanın çoğu ülkesindeki gibi ülkemizde de sıcak karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcılar, karmaşık kimyasal yapılarından dolayı geleneksel yöntemlerle sınıflandırılmaktadır. Geleneksel bağlayıcı şartnameleri çoğu deneye dayalı olarak yapılan penetrasyon, viskozite ve duktilite gibi deneylerle yapılır. Bu fiziksel özellik deneyleri sabit deney sıcaklıklarında yapılır ve deney sonuçları bağlayıcının şartname kriterlerine sağlayıp sağlamadığına bakılır. Geleneksel şartnameler, bağlayıcının kıvamını penetrasyon deneyi ile belirler ve bağlayıcının orta sıcaklık davranışı ile ilgili fikir verir. Ayrıca standart deney sıcaklığı 60 °C ve 135 °C olan ve bağlayıcının esas akış ölçüsünü belirten viskozite değeri bağlayıcının sadece yüksek ısılardaki davranışı ile ilgili bilgi vermektedir. Bu değerler, bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki elastik davranışının tam olarak belirlenmesinde kullanılamamaktadır (The Asphalt Institute 1996). Penetrasyon ve viskozite sınıflandırma sistemleri, birbirlerinden çok farklı sıcaklığa ve performansa sahip bitümleri aynı dereceli gibi gösterebilir. Örnek olarak farklı cinsteki bitümler, aynı penetrasyon ve viskozite sınıfında bulunsalar bile imalat aşamasında ve trafik yükleri etkisinde kaldıklarında farklı performans gösterebilmektedir. Şekil 3.13'te görülebileceği üzere, aynı viskozite derecesine sahip üç farklı bitümlü bağlayıcı, değişik sıcaklıklarda değişik özellikler sergilemektedir. A ve B bitümleri, farklı sıcaklık şartlarında kıvam olarak birlikte artış veya azalış göstermektedir. A ve C bitümlerinin kıvamlılıkları arasındaki fark, düşük sıcaklıklarda az iken yüksek sıcaklıklarda fazladır. B ve C bitümlerinin kıvamlılıkları 60 °C'de aynı olsa da diğer sıcaklık değerlerinde farklılık görülmektedir.



Şekil 3.13. Bitümün farklı sıcaklıklardaki kıvamı (Loh and Olek 1999; Zaniewski and Pumphrey 2004).

Geleneksel yöntemlerle dizayn edilen sıcak karışımların gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması ve eksik yönlerinden dolayı SHRP tarafından asfalt üstyapı şartnamelerinin hazırlanması amacıyla geniş kapsamlı bir araştırma programı hazırlanmıştır. Bu araştırma programının 150 milyon dolarlık fonunun 50 milyon doları, laboratuvar analizi ve arazi performans esaslı asfalt şartnamesi çalışmaları için kullanılmıştır. Araştırma programı sonucunda, hem modifiye ve hem de modifiye olmayan asfaltların doğrudan arazi koşullarındaki performanslarıyla ilgili fiziksel özelliklerini ölçen Superpave bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir (McGenniset et al. 1995; Orhan 2000; Lavin 2003). Bu sistemde bitümler, belirli sıcaklıklar altında gösterdikleri performansa göre sınıflandırıldığı için “Performans Sınıfı (Performance Grade)” olarak isimlendirilmiş ve PG simgesi kullanılarak kısaltılmıştır. Sınıflandırma amaçlı gerçekleştirilen deneylerde, bitümlerin farklı sıcaklık koşulları altında aynı özellikleri göstermesi beklenir. Kaplamanın yapılacağı bölgenin iklim şartları, performans sınıfı bağlayıcı seçiminde en önemli değere sahiptir. İşte bu sistemi, geleneksel sistemlerden ayıran en önemli özellik, tüm performans sınıfları için diğer karakteristikler sabit kalsa bile, deneyin farklı sıcaklıklarda dolayısıyla farklı iklimlere bağlı olarak değişmesidir; çünkü bu fiziksel özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar, kaplamanın kullanılacağı yerin iklim şartlarına göre farklılık gösterir. Örneğin “PG 64 – 22” olarak adlandırılan bitümlü bağlayıcının, 64 °C ve -22 °C’de sergilemesi beklenen performansı, “PG 46 – 40” olarak adlandırılan bitümlü bağlayıcı, 46 °C ve -40 °C’de gösterir. PG simgesini takip eden sayılardan 64, bitümlü bağlayıcının kullanılacağı yerdeki en yüksek kaplama sıcaklıklarının 7 günlük ortalamasını belirtirken -22 ise en düşük kaplama tasarım sıcaklığını belirtir. Şekil 3.14’de bu gösterimi detaylı olarak anlatılmıştır (Federal Highway Administration 2000; Öztürk ve Çubuk 2004; Tunç 2007; Sağlık 2009; Asphalt Institute 2010; Hunter et al. 2015).



Şekil 3.14. Superpave performans sınıfı gösterimi (Kaçaroğlu 2019).

Geleneksel sınıflandırma sisteminde yalnızca geleneksel bitümlerin değerlendirilmesi yapılabilirken performans sınıflandırması, modifiye edilmiş bitümler için de kullanılabilen bir yöntemdir. Karşılaştırma yapıldığında viskozite sınıflandırma sisteminde yer alan İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT), bitümün kısa dönem yaşlanması hakkında bilgi sağlasa da trafik ve çevre koşulları altındaki uzun dönem yaşlanma hakkında bilgi vermemektedir. Superpave performans sınıflandırması ise bitümün kısa ve dönem yaşlanmasını Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) karşılarken uzun dönem yaşlanmasını Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyleri ile karşılanmaktadır (Kaçaroğlu 2019). Superpave sisteminde yol kaplaması yapılacak olan uygulama bölgesinin uzun süreli iklimsel özellikleri ve coğrafi konumu dikkate alınarak belirlenen sıcaklık değerlerinde uygulanan çeşitli deneylerle bağlayıcıların tekerlek izi, yorulma ve düşük sıcaklıklar nedeniyle oluşan çatlaklara karşı performanslar belirlenmektedir. Superpave sisteminde bulunan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları Çizelge 3.5'te verilmiştir (Mcgennis et al. 1994).

Çizelge 3.5. Superpave deneyleri ve kullanım amaçları (Geçkil vd. 2011).

Deney Adı	Kullanım Amacı
Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	Kaplamanın üretim aşaması boyunca bağlayıcının yaşlanmasını belirlemek
Basıncılı yaşlandırma kabı deneyi (PAV)	Kaplamanın hizmet ömrü boyunca bağlayıcının yaşlanmasını belirlemek
Dönel viskozimetre deneyi (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklıklarındaki özelliklerini belirlemek
Dinamik kesme reometresi deneyi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklıklardaki özelliklerini belirlemek
Eğilen kiriş reometresi deneyi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarındaki özelliklerini belirlemek
Doğrudan çekme deneyi (DTT)	

3.2.8. Numunelere uygulanan superpave deneyleri

3.2.8.1. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)

Karıştırma ve serim boyunca bağlayıcının ne kadar yaşlanacağı, laboratuvarında RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile simüle edilmektedir. Bu deneyde amaç olarak asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklıkla birlikte havanın etkisini değerlendirmektedir. RTFOT ile ilgili bir amaç ise yöntemi ile bağlayıcıların ısınması sonucu kaybolan kütle miktarını belirlemektir (Yılmaz 2011).



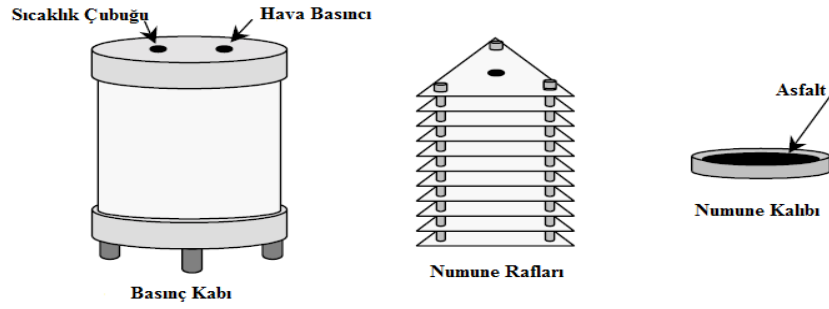
Şekil 3.15. RTFOT deney aleti iç görünüş (a), RTFOT deney aleti deney tüpleri (b).

Şekil 3.15'te görülen RTFOT deneyinde 163 C° sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm eklenip dikey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava üflenmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişe çeperini kaplayarak ince bir film tabakası oluşturması sayesinde yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül (3.1) kullanılarak belirlenmektedir. Denklemde M1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir (Yılmaz 2011; TS EN 12607-1 2015).

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] * 100 \quad (3.1)$$

3.2.8.2. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

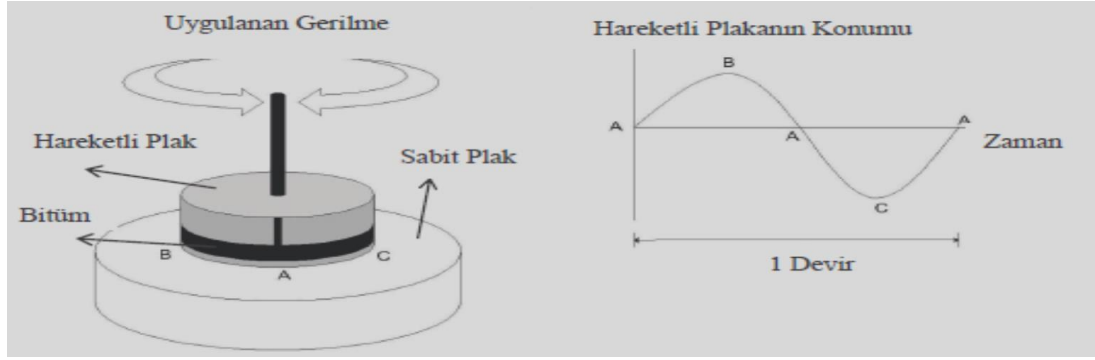
Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bitümlü bağlayıcıların servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli yaşlanma özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFOT deneyi yapıldıktan sonra elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı cinsine göre değişen 90 C° ve 110 C° arasında bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanarak yaşlanması sağlanır. (Zaniewski and Pumphrey 2004). Deney sonucunda çıkan numuneler bitümün reolojik davranışlarını belirlemek üzere tekrardan kullanılırlar. Şekil 3.16'da temsili basınç yaşlandırma kabı görülmektedir.



Şekil 3.16. PAV deney aleti (Reubush 1999).

3.2.8.3. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) deneyi

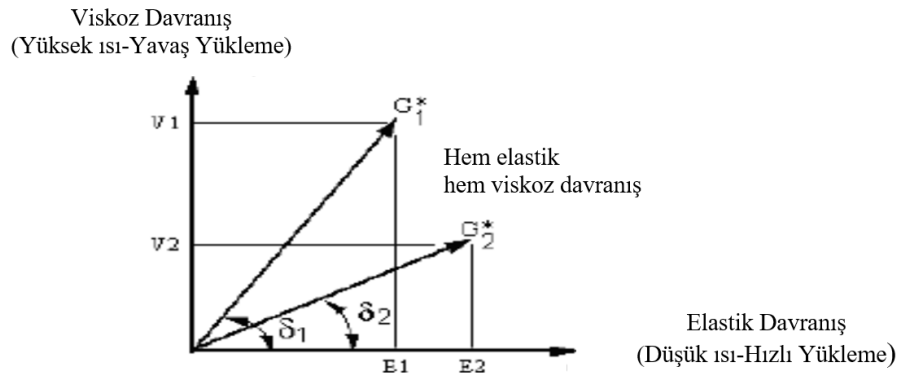
Dinamik Kesme Reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izine karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını bulmak amacıyla herhangi bir işlemde geçmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılır. Bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek içinse PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar 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 2mm olan numuneler kullanılmaktadır (Yılmaz 2011).



Şekil 3.17. DSR deneyi işleyişi (Zaniewski and Pumphrey 2004).

Şekil 3.17’de de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasında bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gidip tekrar A noktasına ulaşip salınım yapmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney süresince tekrarlanır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtmaması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır (Zaniewski and Pumphrey 2004).

Dinamik kesme reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir G^* , tekrar eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının gösterdiği dirençtir. G^* ve δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısıya ve yükleme hızına göre önemli ölçüde değişmektedir (McGennis et al. 1994).



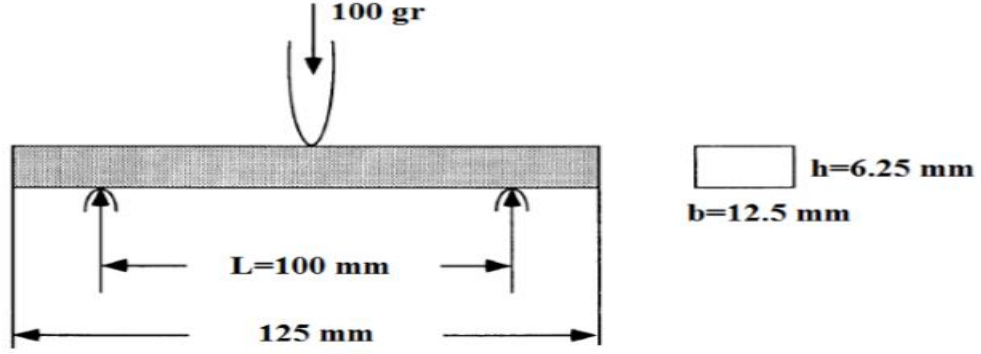
Şekil 3.18. Viskoelastik davranış grafiği (Tunç 2004).

Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına (Δt) eşit olmaktadır. Normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişken bir değer alacaktır fakat faz açısının 0° olması numunenin elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Şekil 3.18'de gösterilen 2 numaralı numunenin 1 numaralı numuneye göre faz açısı (δ) değeri düşüktür, dolayısıyla daha elastik davranıp 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. G^* değerinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (Tunç 2004).

Deney sonucu elde edilen kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan " $G^*/\sin\delta$ " belirlenmektedir. AASHTO TP5-98 standardına göre " $G^*/\sin\delta$ " değerinin yaşlandırılmamış bağlayıcılar için minimum 1000 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise 2200 Pa olması gerekmektedir (Kuloğlu vd. 2008).

3.2.8.4. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

Asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda yüksek oranda rijit (katı) davranış gösterirler. Bu testin amacı, düşük sıcaklıklarda asfalt bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenemediğinden dolayı dinamik kayma testi ile eğilme kiriş testi birlikte ele alınarak asfalt bağlayıcıların oldukça geniş bir ısı aralığındaki rijitlik davranışını saptamaktır. Yani belirli bir ısıda ve sabit bir yük altında bağlayıcının sünmesini veya defleksiyonu ne kadar yapacağını ölçmekten ibarettir. Bu nedenle bu test asfalt kaplamanın sahip olabileceği düşük ısılardaki elastik davranışını belirlemeye çalışmaktadır (Tunç 2004).



Şekil 3.19. BBR numunesinin görünüşü (Zaniewski ve Pumphrey 2004).

Asfalt bağlayıcının sünme sertliğinin belirlenmesi amacıyla, Şekil 4.12’de görüldüğü gibi standart ölçüleri 12,5x125x6,25 mm (0,50x5x0,25 inç) olan asfalt kiriş esas alınarak, klasik kiriş analiz teorisi kullanılmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Kaplamanın düşük sıcaklıklardaki davranışını belirleyebilmek amacıyla, RTFOT ve PAV deneyleri sonucu alınan yaşlandırılmış numuneler kullanılarak kiriş şeklinde hazırlanmış numuneler sabit bir yük altında ve 0’ın altındaki düşük sıcaklıklarda eğilmeye maruz bırakılır. Kiriş numunelerinin 100 gramlık yük etkisinde zamanla oluşacak sehim miktarı tespit edilir. Deneyin yapılışında hazır bilgisayar yazılımı kullanılır ve bu yazılımla birlikte zamana bağlı deformasyon ve sünme sertliği grafiklerinin çizilmesiyle 60. saniye sonunda oluşan Sünme Sertliği (S) ve Sünme Oranı (m) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır (Dinç 1999).

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3 \delta(t)} \quad (3.2)$$

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)

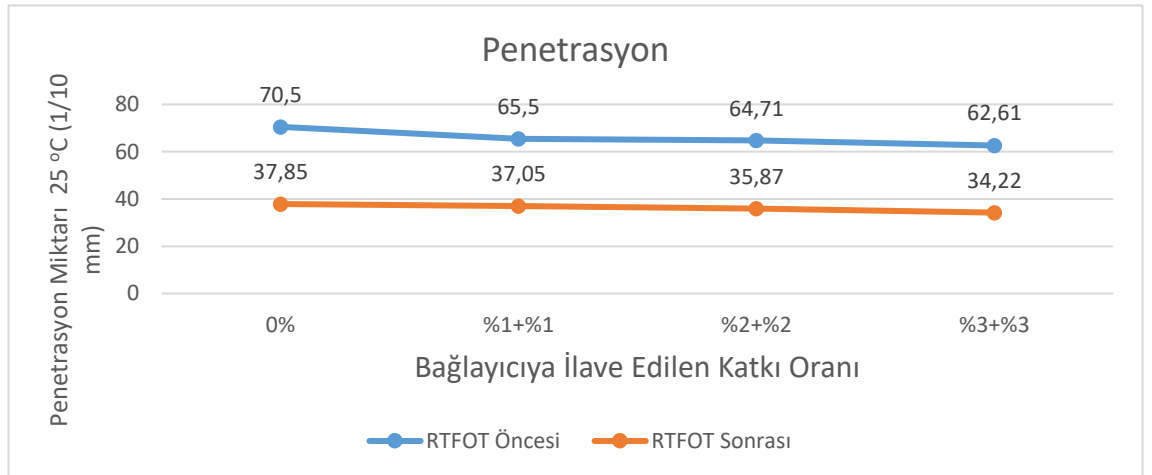
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Deneye yapılacak numuneler etüvden çıkarıldıktan sonra en az 2 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra en az 1 saat boyunca önceden ayarlanmış 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su banyosunun içerisinden alınmış numune içerisinde su olan kabın içerisine alınıp, hemen eşkenar üçgen olacak şekilde 3 farklı noktadan penetrasyon alınır ve alınan penetrasyonların ortalama değeri alınıp penetrasyon değerleri bulunmaktadır. Penetrasyon değerleri Çizelge 4.1’de verilirken grafik olarak Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon deney sonuçları.

Bağlayıcıya İlave Edilen Katkı Oranları	%0	%1 + %1	%2 + %2	%3 + %3
Penetrasyon Değerleri (1/10 mm.) (RTFOT Öncesi)	70,50	65,50	64,71	62,61
Penetrasyon Değerleri (1/10 mm.) (RTFOT Sonrası)	37,85	37,05	35,87	34,22



Şekil 4.1. Bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin değişimi.

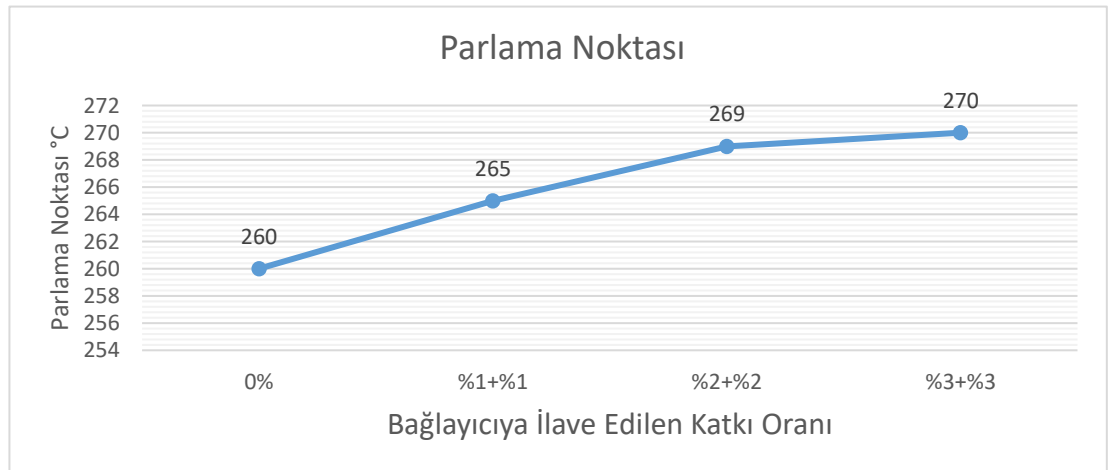
70/100 penetrasyonlu saf bağlayıcıya, ağırlıkça %1+%1, %2+%2 ve %3+%3 SK ve NZrO₂ eklendikten sonra yapılan deney sonuçlarına göre, katkı malzemelerinin saf bağlayıcının penetrasyon değerini yaşlanmadan önce sırasıyla %7,1, %8,21 ve %11,19 oranında azalttığı, yaşlanmadan sonra ise yine sırasıyla %2,11, %5,23 ve %9,59 oranında azalttıkları görülmüştür. Bu değerlerin azalması, bağlayıcının daha sert hale geldiği ve sıcak bölgelerde daha uzun performans ömrüne sahip olduğunu gösterir.

4.2. Parlama Noktası Deneyi (Cleveland Açık Kap Metodu) Sonuçları

Deneyin sonuçları asfalt çimentosunun uygulama sırasında ısıtılırken ortaya çıkabilecek bir tutuşma ve alev alma tehlikesine karşı önlem almak için son derece önemlidir. Deney aleti üzerindeki alev çubuğu, numune üzerinden 1 saniyede geçecek şekilde gezdirilerek, parlama meydana geldiği andaki sıcaklık termometreden okunarak parlama noktası bulunmaktadır. Ayrıca iki aynı tip numune için, ortalamaları alınarak kaydedilen sıcaklık değerleri Çizelge 4.2’de ve grafik olarak da Şekil 4.2’de 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	265	269	270



Şekil 4.2. Bitümlü bağlayıcıların parlama noktası değerlerinin değişimi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

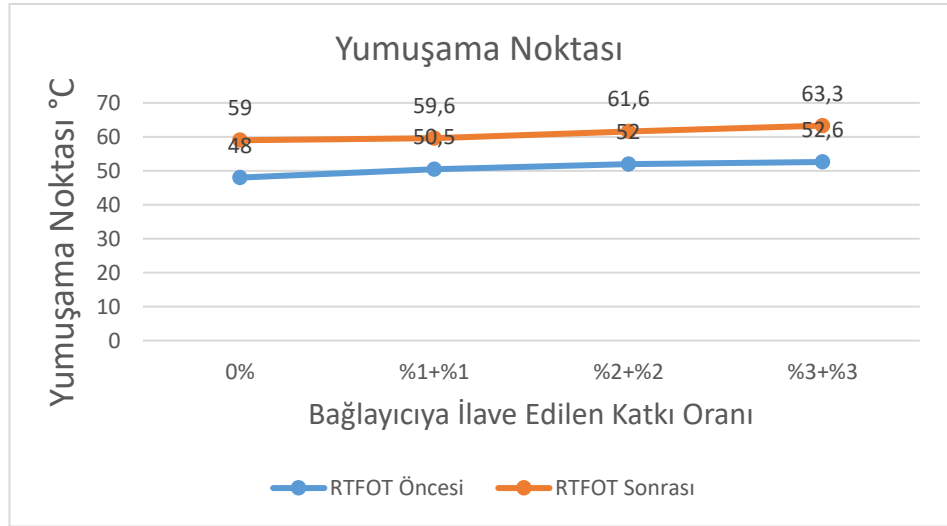
Deney sonuçlarından saf bağlayıcılara göre katkı miktarı arttıkça parlama noktasının arttığı ve şartnameye göre bütün değerlerin 220 °C üstünde olduğu görülmüştür.

4.3. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Orijinal ve katkılı modifiye bitümlü bağlayıcılar üzerinde ve RTFOT deneyiyle yaşlandırılmış olan saf ve modifiye bağlayıcı kalıntılarında fiziksel özelliklerini belirlemek için yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Değerler Çizelge 4.3 ve grafik olarak da Şekil 4.3’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	50,5	52	52,6
RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası (°C)	59	59,6	61,6	63,3



Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinin değişimi

Elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde, katkılı numunelerin RTFOT ile yaşlandırmadan önce sırasıyla %5,2, %8,33 ve %9,58 oranında artırdığı, RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra ise yumuşama noktası değerini katkı oranının artışı ile birlikte sırasıyla %1,01 , %4,4 ve 7,8 oranında düşürdüğü görülüp elde edilen değerler şartname

sınırları içerisinde kalmıştır. Bu durum katkılar artıkça bağlayıcının sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünün göstergesidir.

4.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları

Deney 163 °C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır. Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm eklenip dikey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava üflenmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişe çeperini kaplayarak ince bir film tabakası oluşturması sayesinde yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül (4.1) kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir (Yılmaz 2011; TS EN 12607-1 2015).

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = [(M1-M2) / M1] * 100 \quad (4.1)$$

Çizelge 4.4. 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	35,2	35,2	35,2	35,3	35,3	35,3
Son Kütle (gr)	34,9	35,1	35,0	35,1	35,1	35,0	35,0	35,0
Kütle Kaybı (%)	0,286	0,284	0,568	0,284	0,284	0,850	0,850	0,850
Şartname Sınırı (%)	$\leq 1,000$							
Ortalama (%)	0,285		0,426		0,567		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, katkı miktarı arttıkça kütle kaybının arttığı ve sonuçların şartname sınırı olan %1'in altında olduğu belirlenmiştir.

4.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bitümlü bağlayıcıların servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli yaşlanma özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFOT deneyi yapıldıktan sonra elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı cinsine göre değişen 90 °C ve 110 °C arasında bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanarak yaşlanması sağlanır (Zaniewski and Pumphrey 2004). Bu çalışma kapsamında, önce RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi bünyesindeki İSFALT laboratuvarına gönderilerek, PAV deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonrası geri alınan numuneler BBR deneyini yapmak üzere kullanılmak üzere ayrılmıştır.

4.6. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

Dinamik kayma deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) hesaplayarak bitümün viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekrar eden kayma gerilmelerinden doğan deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam dirençtir. Faz açısı, uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısının 0° olması numunenin elastik davrandığını, 90° olması ise viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının yüksek olması bağlayıcının daha fazla viskoz özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Deney sonucu elde edilen kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan " $G^*/\sin\delta$ " belirlenmektedir. AASHTO TP5-98 standardına göre " $G^*/\sin\delta$ " değerinin yaşlandırılmamış bağlayıcılar için minimum 1000 Pa, RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise 2200 Pa olması gerekmektedir (Kuloğlu ve ark. 2008).

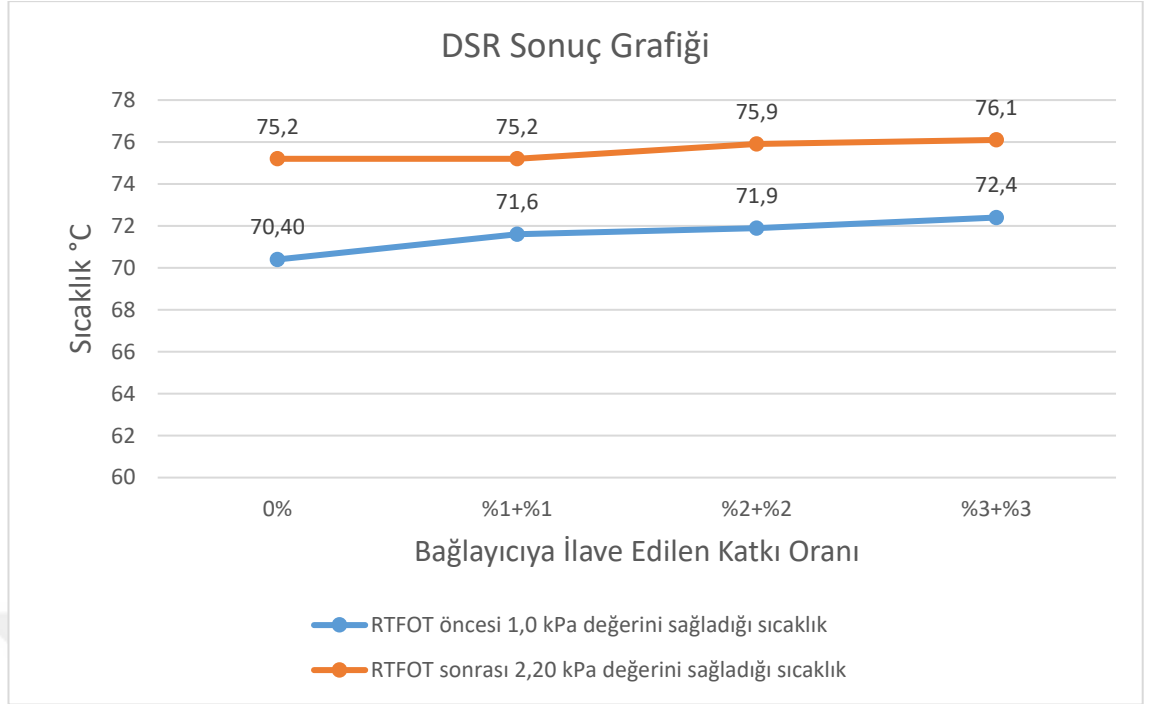
70/100 penetrasyonlu saf bağlayıcıyla yapılan deney sonrasında, yaşlandırılmamış numunelerle RTFOTla yaşlandırılan numunelerin deney sonuçları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.5’de verilirken, Şekil 4.4’de ise grafiksel olarak gösterilmiştir. Deney numuneleri akışkan hale gelinceye kadar etüvde ısıtılarak, özel silikon kalıplara doldurulduktan sonra oda sıcaklığında 30 dakika boyunca bekletilmiştir. Soğuyan numuneler sırayla deney aletine yerleştirildikten sonra ünite kapatılıp, bilgisayar destekli deney aletine başlangıç sıcaklığı 58 °C girilerek deney gerçekleştirilmiştir ve 6 °C artacak şekilde şartname değerleri sağlanıncaya kadar otomatik olarak deney devam etmektedir. Aynı işlemler yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılan numuneler için deney başlığı ve alt plaka değiştirilerek tekrar edilmiştir.

Çizelge 4.5. Bitümlü bağlayıcıların DSR deneyi sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Sağladığı Sıcaklık (°C)	Sınır Değer (kPa)	PG Sınıfı	
SAF	Orijinal	58	4,32	77,81	4,42	70,4	≥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	75,2	≥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	5,96	75,81	6,15	71,6	≥1,00	PG 70-Y
		64	2,36	79,77	2,40			
		70	1,18	82,32	1,19			
		76	0,60	84,39	0,61			
	RTFOT Sonrası	64	7,33	70,61	7,77	75,2	≥2,20	PG 70-Y
		70	3,57	74,53	3,70			
		76	1,91	77,70	1,96			
%2 ALY + %2 NKO	Orijinal	58	5,03	76,43	5,17	71,9	≥1,00	PG 70-Y
		64	2,41	79,41	2,45			
		70	1,18	81,76	1,93			
		76	0,64	83,28	0,65			
	RTFOT Sonrası	64	7,99	71,67	8,42	75,9	≥2,20	PG 70-Y
		70	4,05	75,51	4,18			
		76	2,10	78,83	2,14			
%3 ALY + %3 NKO	Orijinal	58	7,03	76,51	7,23	72,40	≥1,00	PG 70-Y
		64	2,50	80,70	2,53			
		70	1,32	82,96	1,33			
		76	0,61	85,24	0,62			
	RTFOT Sonrası	64	8,37	71,62	8,82	76,10	≥2,20	PG 76-Y
		70	4,18	75,28	4,32			
		76	2,12	78,58	2,16			



Şekil 4.4. 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 hepsinin PG 70-Y sınıfı için şartname değerini sağladığı görülmüştür. RTFOT ile yaşlandırılan numunelerden ise saf ve %1+%1, %2+%2 katkılı bağlayıcıları PG 70-Y değerini alırken %3+%3 katkılı bağlayıcı PG 76-Y değerini aldığı görülmüştür.

Deney sonuçları incelendiğinde, RTFOT ile yaşlandırmadan önce saf bağlayıcıya göre, katkılı bitümlerde G^* ve $G^*/\sin\delta$ arttığı görülmüştür. RTFOT ile yaşlandırmadan sonra dayanımının önce bir miktar artıp sonra ise düşeceği görülmektedir. RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonraysa saf bağlayıcıya göre G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerleri %1+%1 katkıda azalıp, %2+%2, %3+%3 katkılarda arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.4'deki grafikte, yaşlandırılmadan önce saf bağlayıcıya göre PG değerleri %1+%1 katkı oranındaki bağlayıcı için % 1,70; %2+%2 katkı oranındaki bağlayıcı için % 2,13; %3+%3 katkı oranındaki bağlayıcı için % 2,84 oranında artırırken yaşlandırdıktan sonra PG değerleri %1+%1 katkı oranındaki bağlayıcı için herhangi bir

değişim olmamakla beraber %2+%2 katkı oranındaki bağlayıcı için % 0,93; %3+%3 katkı oranındaki bağlayıcı için % 1,2 oranında artış gerçeklemiştir.

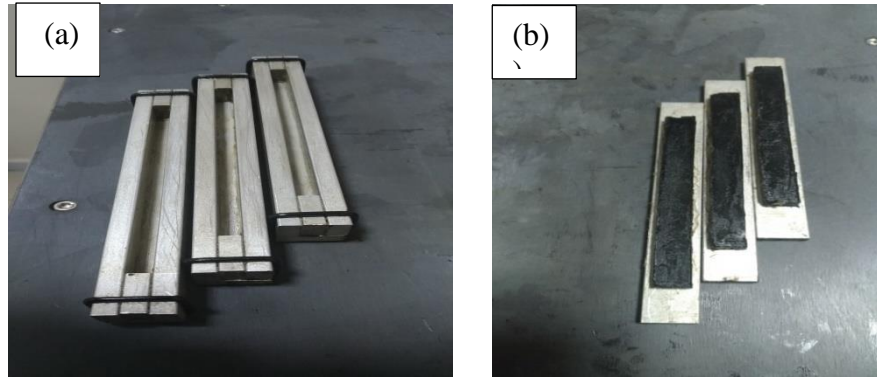
Yaşlanmamış numunelerde katkı oranı arttıkça sağlanan sıcaklık değerinde artış olduğu ancak PG-70 değerinin değişmediği görülmüştür. Yaşlandırılmış numunelerde ise katkı oranı artışında sağlanan sıcaklıkta artış %3+%3 katkı oranında ise PG değerini PG-70'den 6 C° artırarak PG-76 değerine çıkarmıştır. Genel olarak katkı oranı arttıkça tekerlek izi dayanımının arttığı sıcaklık hassasiyetinin düştüğü ve daha sıcak yerlerde kullanılabilmesi görülmüştür.

4.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları

Bu testin amacı, düşük sıcaklıklarda asfalt bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki bağlantıyı bulmaktır. Düşük sıcaklıklarda deney yapmak için sıfırın altında donmayacak olan metanol maddesi seçilmiştir. Deney yapmak için bitüm kiriş şeklinde kalıplara dökülüp çıkarıldıktan sonra deney düzeneğinde 240 saniye boyunca üzerine etkiyen 980 mN sabit yük altında defleksiyonu hesaplanır. Tabii tutulduğu sıcaklıkta 60. saniyedeki sertlik değeri ($S_{(t)}$) 300 MPa'ın altında, sünme oranının da (m) 0,300 den daha yüksek değerde olmalıdır. Bu değerler bilgisayar tarafından otomatik olarak verilmektedir. Sünme rijitliği ($S_{(t)}$), bitümün düşük sıcaklıklardaki çatlama karşı göstereceği dirençtir. Sünme rijitliği yüksek olan bitüm gevrek davranış göstereceğinden düşük sıcaklıklarda çatlama daha çok elverişlidir (Tunç 2007). Sünme oranı (m) bitümün düşük sıcaklıkta çatlama karşı olan direncinin göstergesidir. Daha yüksek m değerine sahip olan bitüm sıcaklık azalmasına daha düşük rijitlikle tepki verecektir. Böylece bu davranışa sahip olan bitüm düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamalara karşı daha fazla direnç göstermektedir (Lavin 2003).

Düşük sıcaklıklarda termal çatlama en aza indirmek için sünme rijitliği ($S_{(t)}$) az olması sünme oranı (m) değerinin ise fazla olması istenmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.5. BBR deney numunelerinin hazırlanması (a), (b).



Şekil 4.6. BBR deneyi

Yapılan deney sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6’da verilmektedir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının PG sınıfının -28 olduğu bütün katkı oranlarında PG sınıfını -22’ye yükseldiği görülmüştür.

Çizelge 4.6. 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	16,85	0,239	43,45	0,265	161,30	0,314	-	-	X-28
%1+%1	27,37	0,408	87,77	0,521	348,47	0,364	-	-	X-22
%2+%2	25,80	0,310	43,66	0,305	84,22	0,289	-	-	X-22
%3+%3	53,70	0,450	135,69	0,397	-	-	-	-	X-22

4.8. Bitümlü Bağlayıcıların PG Sınıflarının Belirlenmesi

Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (SUPERPAVE) yönteminde bitümler, farklı sıcaklık şartlarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür bitümlü bağlayıcılara "Performans Sınıfı (Performance Grade)" bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, bitümlün tanımlanması için yapılan deneylerde bitümlen beklenen özellikler aynı olmakla beraber bu özelliklerin performans gösterdiği sıcaklıklar farklılık gösterir (Öztürk ve Çubuk 2004).

Yapılan bu çalışmada, yaşlandırılmamış katkısız bitümlü bağlayıcı Performans Sınıfı saf bağlayıcıyla %1SK+%1NZrO₂, %2SK+%2NZrO₂ ve %3SK+%3NZrO₂ içeren modifiye bitümlü bağlayıcıların hepsi PG70-Y olarak bulunmuştur. RTFOT yöntemi ile yaşlandırıldıktan sonra ise, katkısız bitümlü bağlayıcı sınıfı PG 70-28, %1SK+%1NZrO₂ ve %2SK+%2NZrO₂ içeren modifiye bitümlü bağlayıcının sınıfı ise PG 70-22, %3SK+%3NZrO₂ içeren modifiye bitümlü bağlayıcının sınıfı ise PG 76-22 olarak belirlenmişlerdir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bitüm, esnek üstyapılarda kullanılan çok önemli bir parametredir ve sahip olduğu özellikler bakımından üstyapının performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada da bitüme çeşitli katkı maddeleri katılarak bitümün özellikleri geliştirilip modifiye edilmesi amaçlanmıştır. Katkı olarak ömrünü tamamlanmış lastiklerin pirolizlerinden elde edilen karbon siyahı ile nano boyuttaki Zirkonyum Dioksit kullanılmıştır. Deney sonuçları özet halinde aşağıda verilmiştir.

Daha önceden ömrünü tamamlamış lastikler ve ömrünü tamamlamış lastiklerden üretilen çeşitli maddeler ile nano oksit maddeler farklı modifiye bitüm üretim aşamalarında kullanılmış olup siyah karbon ve nano zirkonyum dioksit ilk defa kullanılmıştır.

Batman rafinerisinden alınan 70/100 penetrasyonlu bitüme ağırlıkça %1SK+%1NZrO₂, %2SK+%2NZrO₂ ve %3SK+%3NZrO₂ eklenerek bütün numunelerin penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, Dinamik Kesme (Kayma) Reometresi (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 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyleri uygulanarak, bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerindeki değişimlere bakılmıştır.

Deney sonuçlarına bakıldığında katkı miktarı arttıkça penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının ise arttığı görülmüştür. Sonuçlardan hareketle penetrasyon azaldığından dolayı malzemenin giderek sertleştiği sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü ve bitümün daha sıcak yerlerde kullanılabileceğini gösterirken yumuşama noktasının artmasıyla birlikte tekerlek izi dayanımının paralel bir şekilde arttığı gözlemlenir.

Bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlanmalarını karakterize etmek için yapılan RTFOT deneyi ile ise katkı miktarının artması ile kütle kaybının da bir miktar arttığı fakat şartname sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür.

Parlama noktası deneyinde, katkı miktarının artmasıyla parlama noktasının saf bağlayıcıya göre arttığı ve bütün değerlerin şartname sınırı olan 220 °C'nin üzerinde kaldığı görülmüştür. Parlama noktasının artması yol inşaatı uygulama zamanında asfaltın hangi ısıda alevlenme ve yanma tehlikesini düşürme yönünde yararlı olmuştur.

Deneyden ulaştığımız sonuçlar, Geçkil (2008)'in, Siyah Karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması ve Taşçı (2010)'nın Piroiliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri adlı çalışmalarda elde edilen sonuçlarla çalışmadan elde edilen sonuçlar arasında paralellik görülmektedir. Geçkil (2008)'in yapmış olduğu çalışmada saf PG 58-28 bağlayıcısına ağırlıkça %5, %10 ve %15 Siyah Karbon (SK) ilave edilerek PG 58-28+%5SK, PG 58-28+%10SK ve PG 58-28+%15SK modifiye bağlayıcıları elde edilmiştir. Bağlayıcıların DSR sonuçları incelendiğinde %5 SK katkılı bağlayıcının performans derecesinde PG 58-28 bağlayıcısına göre değişim olmadığı, %10 SK katkılı bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde bir sınıf (6 °C) artarken %15 SK katkılı bağlayıcının iki sınıf (12 °C) artmıştır. BBR sonuçları incelendiğinde ise düşük sıcaklık performans derecelerinde %5 SK ve %10 SK katkılı bağlayıcılarda herhangi bir değişim gözlenmezken %15 SK katkılı bağlayıcıda bir sınıf (6 °C) artmıştır.

DSR deneyi sonuçları incelendiğinde, SK ve NZrO₂ katkılarının, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı dayanımını artırdığını ve farklı sıcaklık aralarında elastiklik özelliğini de arttığı görülmüştür. Hem yaşlandırılmadan önce hem yaşlandırılmadan sonra katkı oranı arttıkça yenilenme sıcaklığında artışlar görülmüştür. Saf bağlayıcının PG-70 iken yaşlandırılmış %3SK+%3NZrO₂ numunesinde 6 C° yani bir sınıf artırmıştır.

BBR deney sonuçları değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının PG sınıfının -28 olduğu bütün katkı oranlarında (%1SK+%1NZrO₂, %2SK+%2NZrO₂ ve %3SK+%3NZrO₂) PG sınıfını -22'ye yükseldiği görülmüştür. Genel olarak PG sınıflarını değerlendirdiğimizde katkisiz bitümlü bağlayıcı sınıfı PG 70-28, %1SK+%1NZrO₂ ve %2SK+%2NZrO₂ içeren modifiye bitümlü bağlayıcının sınıfı ise PG 70-22, %3SK+%3NZrO₂ içeren modifiye bitümlü bağlayıcının sınıfı ise PG 76-22

olarak belirlenmişlerdir. Bu sonuçlardan hareketle modifiye bitümlerin daha sıcak iklim bölgelerinde kullanılabileceği ve düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı dirençli olduğu görülmüştür.

Günümüzde her geçen gün artan nüfusa paralel olarak motorlu araç sayısında artış beraberinde artış lastik sayısını artırmış ve çevre kirliliği salgın hastalıklar ve yangınlar gibi birçok sorunu meydana getirmiştir. Ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen siyah karbonun bitüm modifikasyonunda kullanılması ömrünü tamamlamış lastiklerden meydana gelen sorunlara ve doğal kaynakların kullanılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca diğer katkı maddesi olan Zirkonyum Dioksitin ZrO_2 diğer oksitler gibi iyonik bağlı olup, saydamlık, ısı ve elektrik iletimine direnç, diamanyetizma, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda iyonik iletkenlik gibi yüksek elastik modül ve sertlik, gevreklik, refrakterlik, düşük termal genleşme katsayısı, korozyona karşı direnç ve yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncına sahip olması gibi avantajlarının da bitümde yararlı olacağı düşünülmüştür.

Daha sonraları yapılması düşünülen çalışmalarda modifiye bitüm üzerinde, tezde yapılmayan Marshall Stabilitesi, Düktilite, Depolama stabilitesi ve Viskozite gibi deneylerin de yapılması performansı üzerine daha detaylı bilgi alacağımızdan yapılması önerilmektedir.

Modifiye bitümde kullandığımız siyah karbon ve nano boyuttaki Zirkonyum Dioksit katkıları maliyetleri artırıyor gibi gösterse de maruz kalacağı bakım onarım maliyetlerini gösterdiği performansla ve sağladığı üstün özellikleriyle ekonomiklik sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2002. Web sitesi: <http://www.saujs.sakarya.edu.tr/tr/download/article-file/193145>, Erişim Tarihi: 17.08.2020.
- Anonim, 2011. Web Sitesi: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/At%C4%B1k%20Lastikler.pdf, Erişim Tarihi: 05.01.2020.
- Anonim, 2012a. Web sitesi: <http://openaccess.inonu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11616/4782/Makale.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, Erişim Tarihi: 15.03.2020.
- Anonim, 2012b. Web Sitesi: <http://www.lasder.org.tr/anasayfa.aspx?MenuID=9>, Erişim Tarihi: 22.03.2020.
- Anonim, 2014. Web Sitesi: <https://www.utikad.org.tr/images/BilgiBankasi/istatistikler/leulastirmadenizcilikvehaberlesme20032014-6245.pdf>, Erişim Tarihi: 21.02.2020.
- Anonim, 2015. Web Sitesi: <https://www.milliyet.com.tr/dunya/resife-lastik-mayasi-tutmadi-2748372>, Erişim Tarihi: 1.05.2020.
- Anonymous, 1999. Web Sitesi: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>, Erişim Tarihi: 21.04.2020.
- Anonymous, 2004. Web Sitesi: <http://www.dnr.state.oh.us/recycling/awareness/facts/tires/rubberrecycling.html>, Erişim Tarihi 18.07.2020.
- Anonymous, 2012. Web Sitesi: http://www.entireengineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf, Erişim Tarihi: 24.03.2020.
- Anonymous, 2013. Web Sitesi: <http://bioweb.sungrant.org/NR/rdonlyres/57BCB4D0-1F59-4BC3-A4DD4B72E9A3DA30/0/Pyrolysis.pdf>, Erişim Tarihi: 29.05.2020.
- Anonymous, 2015. Web Sitesi: https://rma.org/sites/default/files/RMA_scraptire_summ_2015.pdf, Erişim Tarihi: 1.05.2020.
- Anonymous, 2019. Web Sitesi: <https://www.pavementinteractive.org/>, Erişim Tarihi: 05.05.2020.
- Abraham, H. 1945. Asphalts and allied substances: Their occurrence, Modes of production, Uses in the arts and methods of testing, fifth edition, Vol 1: Raw Materials and Manufactured Products. D. van nostrand company, 887, New York.
- Acar Bozkurt, P. 2011, Atık lastik-kömür karışımlarının piroliz ve kritik üstü ekstraksiyonla değerli ürünlere dönüştürülmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, 234, Ankara.

- Acevedo, B. Barriocanal, C. Lupul, I. and Gryglewicz, G. 2015. Properties and performance of mesoporous activated carbons from scrap tyres, bituminous wastes and coal. *Fuel*, 151, 83-90.
- Amirkhanian, S. 2001. Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures South Carolina's Experience. Proceedings of the International Symposium Organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and Held at the University of Dundee, Recycling and Reuse of Used Tyres, 163-174, Dundee.
- Antonionu, N. and Zabaniotou, A. 2013. Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(1), 539–558.
- Antonionu, N. and Zabaniotou, A. 2013. Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(C), 539–558.
- Arslan, D. 2010. Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal ve Polibor katkı Maddeleriyle Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 322, Ankara.
- Asphalt Institute. (2010). *The Asphalt Handbook*, 7th ed. Asphalt Institute, Lexington, KY, USA.
- Aylon, E. Fernandez-Colino, A. Murillo, R. Navarro, M. V. Garcia, T. and Mastral, A. M. 2010. Valorisation of waste tyre by pyrolysis in a moving bed reactor. *Waste Management*, (30)7, 1220-1224.
- Bahia, H. U. Hanson, D. I. Zeng, M. Zhai, H. Khatri, M. A. Anderson, R. M. 2001. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459, 14 August, DC, National Academy Press, 53, Washington.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis*, Elsevier, 376, England.
- Biennial Reports. 2009. Scrap tire markets in the United States. Rubber Manufacturers Association, 5, Washington.
- Bridgwater, T. 2006. Review Biomass for Energy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 1755-1768.
- Cao, W. 2007. Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21, 1011-1015.
- Chandrasekaran V. C. 2007. *Essential Rubber Formulary*. William Andrew, 202, United States.
- Chevalier, J. 2006. What future for zirconia as a biomaterial. *Biomaterials*, 4(27), 535-543.

- Chhiti, Y. and Kemiha, M. 2013. Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. The International Journal of Engineering And Science, 2(3), 75-85.
- Clark, B. R. Piacere, L. and Gallage, C. 2017. Effects Of Recycled Asphalt Pavement On The Stiffness And Fatigue Performance Of Multigrade Bitumen Asphalt. Journal Of Materials In Civil Engineering, 30(2), 04017278.
- Colin A. Franco, 2005. P.E. New England Rubber- Modified Asphalt and Civil Engineering. Rıdot research and technology, 48, Rhode Islands.
- Çelik, O. N. Atasagun, N. Taşcı, A. ve Lorasokkay, M. A. 2011. Sıvılaştırılmış Atık araç Lastikleri ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri ve Marshall Stabilitesi, 9. Ulaştırma Kongresi Sürdürülebilir Ulaştırma, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryumu, Beşiktaş/İstanbul, Bildiriler Kitabı, 71-80, İstanbul.
- Dantas Neto, S. A. Farias, M. M. Pais, J. C. and Pereira, A. A. 2003. Optimization of Asphalt Rubber Hot Mixes Based on Performance Laboratory Tests, Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 524, Guimaraes, Portugal.
- Demirbas, A. 2009. Biorefineries: current activities and future developments, Energy Conversion and Management, 50(11), 2782-2801.
- Deniz, M. T. Sönmez, İ. Yıldırım, S. A. ve Eren, B. K. 2005. Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi, 6. Ulaştırma Kongresi, 23 Mayıs, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 440, İstanbul.
- Emiroğlu, M. 2006. Atık Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74, Elazığ.
- Engle, E. Mujeeb, M. Gansen, E. Prasetyo, A. and Anderson, C. 2002. Evaluation of Recycled Rubber in Asphalt Cement Concrete Field Testing. Iowa Department of Transportation, 73, USA.
- EPA. 1997. Air Emissions from Scrap Tire Combustion. United States Environmental Protection Agency, 115, Washington.
- European Tyre and Rim Technical Organisation (ETRTO). 2016. Impact of Casing and Retreading Process on Labelling, 42, Belgium.
- Federal Highway Administration, 2000. Superpave Fundamentals: Reference Manual. NHI Course, 157, Washington.
- Geçkil, A. 2013. Öğütülmüş araç lastiğinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklık ve elastik özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 153, Elazığ.

- Geçkil, T. 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 273, Elazığ.
- Güngör, M. 2020. Ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen ağır lastik yağı ve nano krom oksit ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi (basılmamış). Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 93, Erzurum.
- Hamzah, M. O. Mohamed A. A. and Ismail, H. 2006. Laboratory Investigation of The Properties of a Newly Developed Crumb Rubber Modified (CRII) Asphalt Mixtures. Emirates Journal for Engineering Research, 11(2), 67-72.
- Huang, J. Li, G. He, W. Xu, J. Wang, H. and Yang, L. 2012. Energy Analysis of Tire Life Cycle. Automotive Eng, 34(3), 277-281.
- Hunt, E. A. 2002. Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon. Oregon Department of Transportation, 358, UK.
- Hunter, R.N. Self, A. and Read, J. 2015. The shell bitumen handbook, Sixth Edition. Shell Bitumen by ICE Publishing, 808, London.
- ICBA (International Carbon Black Association). 2004. Carbon Black User's Guide. Safety, Health, & Environmental Information, 30, Belgium.
- İlıcılı, M. Tayfur, S. Özen, H. Sönmez, İ. ve Eren, K. 2001. Asfalt ve uygulamaları. İSFALT Bilimsel Yayınları, No.1. 280, İstanbul.
- İmamoğlu, C. T. 2012. Atık Lastik Katkılı Asfalt Kaplamaların Trafik Gürültüsünü Sönümlemedeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 143, İstanbul.
- Kaçaroğlu, G. and Saltan, M. Cocamide Diethanolamide Kimyasalının Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1000(1000), 0-0.
- Karabörk, F. ve Akdemir, A. 2011. Atık taşıt lastiklerinin devulkanizasyonla geri kazanımı. Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi, (3), 21-35.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). 2017. Stratejik Plan 2017-2021. KGM Yayını, 123, Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi. KGM Yayını, 431, Ankara.
- Kırkoğlu, S. 1990. Endüstriyel Hammaddeler. İTÜ Yayınları, 1418, İstanbul.
- Kızıldaş, Ü. 1999. Lastik Üretiminde Katkı Elemanlarının Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, İstanbul.

- Lavin, P. G. 2003. Asphalt Pavements. Spon Pres, 444, London and New York.
- Limbachiya, M. C. and Roberts, J. J. 2004. Used/Post-consumer tyres. Thomas Telford, Kingston University, 335, London.
- Lindemann W 2000. Dentalkeramiken-mineralogisch betrachtet. Zahnheilkunde, Management and Kultur, 16(5), 280–285.
- Lindenmuth, B. E. 2006, An overview of tire technology, The Pneumatic Tire, Walter. J.U.S. Department of Transportation, 1(56), 1-27.
- Loh, S. and Olek, J. 1999. Contributions of PG Graded Asphalt to low Temperature Cracking Resistance of Pavement. Joint Transportation Research Program, 172, Indiana.
- 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.
- Macit, S. 2003. Reverber Fırın Cürufunun Sıcak Karışım Asfalt Betonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 86, Trabzon
- Martinez, J. D. Murillo, R. and Garcia, T. 2013. Production of carbon black from the waste tires pyrolysis. Bol. Grupo Español Carbón, 23, 10-14.
- Mashaan, N. S. Ali, A. H. Karim, M. R. and Mahrez, A. 2012. An overview of crumb rubber modified asphalt. International Journal of the Physical Sciences, 7(2), 166-170.
- Mashaan, N. S. and Karim, M. R. 2013. Investigating the Rheological Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen and its Correlation with Temperature Susceptibility. Materials Research, 16(1), 116-127.
- 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.
- 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.
- Mckendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology, 83, 47–54.
- MEGEP, 2008. Lastik Hamuru Hammaddeleri-3. Kimya Teknolojisi, 38, Ankara.
- Menapace, I. Cucalon, L. G. Kaseer, F. Arámbula-Mercado, E. Martin, A. E. Masad, E. and King, G. 2018. Effect Of Recycling Agents In Recycled Asphalt Binders

- Observed With Microstructural And Rheological Tests. *Construction And Building Materials*, 158, 61-74.
- Myhre, M. Saiwari, S. Dierkes, W. and Noordermeer, J. 2012. Rubber Recycling: Chemistry, Processing, and Application. *Rubber Chemistry and Technology*, 85(3), 408-449.
- Navarro, F. J. Partal, P. Martinez-Boza, and F. Gallegos C. 2004. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel*, Campus del Carmen, 2041-2049, Spain.
- Oh, W. S. Shen C. 2003. Effect of surface topography on the bond strength of a composite to three different types of ceramic. *J Prosthet Dent*, 3(90), 6-241.
- Orhan, F. 2000. Asfaltın Geleceği Superpave, 3.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., 146-160, Ankara.
- Orhan, F. 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları. Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü, 39, Ankara.
- Önal, A. ve Kahramangil, M. 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı El Kitabı. Karayolları Genel Müdürlüğü, 156, Ankara.
- Özbaş, H. 2004. Yüksek Yoğunluklu Polietilene Karbon Siyahı Karıştırılması İşlemindeki Proses Parametrelerinin Tork Reometresi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 57, İstanbul.
- 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.
- Özyurtkan, M. H. Özçimen, D. and Meriçboyu, A.E. 2008. Investigation of the carbonization behavior of hybrid poplar. *Fuel processing technology*, 89(1), 858-863.
- Paine, K. A. Moroney, R. C. and Dhir, R. K. 2004. Application of Granulated Rubber to Improve Thermal Efficiency of Concrete, in *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres* Eds. Limbachiya, 85-95.
- Paje, S. E. Bueno, M. Terán, F. Miró, R. Pérez-Jiménez, F. and Martínez, A.H. 2010. Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Applied Acoustics*, 71, 578-582.
- Pangeliyev, Y. 2014. Ömrünü tamamlamış lastiklerden piroliz/gazlaştırma ile değerlendirilebilir ürün eldesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 102, İstanbul.
- Parkash, S. 2010. *Petroleum Fuels Manufacturing Handbook*. McGrawHill Book Company, 188, Washington.

- Pehlken, A. Essadiqi, E. 2005. Scrap Tire Recycling In Canada. Canmet Materials Technology Laboratory Report, 8, Canada.
- Phetcharat, S. and Kongsuwan, S. 2003. Use of Reclaimed Rubber to Develop Slurry Seal, Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, April, Bangkok, 6, Thailand.
- Piconi, C. and Maccauro, G. 1999. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*, 20(1), 1-25.
- Popovic, N. 2000. Physical and Chemical Characterization and Upgrading of Char Derived from Scrap Tires by Ultra Fast Pyrolysis. Master of Science, Memorial University of Newfoundland St. John's, Newfoundland, 120 ,Canada.
- Prakash, N. and Karunanithi, T. 2008. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis—A Review. *Journal of Applied Sciences Research*, 4(12), 1627-1636.
- Probstein, R. F. and Hicks, R. E. 1982. Synthetic fuel. Dover Publication, 512, Mineola.
- Putman, B. J. Thompson, J. U. and Amirkhanian, S. N. 2005. High Temperature Properties of Crumb Rubber Modified Binders, The Fourth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, January, 22, Clemson University, USA.
- Rada, E. C. Ragazzi M. Dal Maschio R. Ischia M. Panaitescu V. N. Energy Recovery From Tyres Waste Through Thermal Option. *UPB Sci Bull*, 74(4), 201-210.
- Rafi, J. Kamal, M. A. Ahmad, N. Hafeez, M. Faizan ul Haq, M. Aamara Asif, S. and Bilal Ahmed Zaidi, S. 2018. Performance Evaluation of Carbon Black Nano-Particle Reinforced Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 8(7), 1114.
- Rahman, A. N. E. Akmal, M. A. and Prasad, K. B. S. 2001. Pyrolysis of Solid Wastes, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 60(1), 112-127.
- Ramazanoğlu, Ş. 2002. Zirkonyum ve Zirkon. *Sakarya University Journal of Science*, 6(2), 185-189.
- 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.
- Rubber Manufacturers Association. 2006. Scrap tire markets in the United States: 2005 edition. Washington DC, 89, ABD.

- Sağlık, A. 2009. Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı İçin Performans Sınıflarının Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 188, Ankara.
- Saleh, T. A. and Gupta, V. K. 2014. Processing methods, characteristics and adsorption behavior of tire derived carbons: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 211, 93-101.
- Sienkiewicz M. Lipka J.K. Janik H. and Balas A. 2012. Progress in Used Tyres Management in the European Union: A Review. *Waste Management*, 32(10), 1742-1751.
- Sienkiewicz, M. Kucinska-Lipka, J. Janik, H. and Balas, A. 2012. Progress in used tyres management in the European Union, *Waste Management*, 32(10), 1742-51.
- Stevens, R. Hennike, D. 1992. ZrO-Keramik, In: Kriegsmann J (Hrgs.): *Technische Keramische Werkstoffe*. Grundwerk, Deutscher Wirtschaftsdienst, 1-101, Köln.
- Sullivan, J. P. 2006. An Assessment of Environmental Toxicity and Potential Contamination from Artificial Turf using Shredded or Crumb Rubber. *Turfgrass Producers International*, 39, Woodland.
- 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.
- Technical Working Group of the Basel Convention. 1999. *Technical Guidelines On The Identification And Management Of Used Tyres In Basel*. Basel Convention series, 114, Basel.
- Terry, A. G. and Hammer, C. 2004. *Designing Building Products Made With Tires*. Integrated Waste Management Board, 21, California, USA.
- The Asphalt Institute. 1996. *Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2)*, 100, USA.
- Tiilikkala, K. Fagernas, L. and Tiilikkala, J. 2010. History and Use of Wood Pyrolysis Liquids as Biocide and Plant Protection Product. *The Open Agriculture Journal*, 4(1), 111-118.
- Toplan, N. 2001. Plazma Püskürtüne Kaplama Tekniği İle Seramik Esaslı Şekilli Parça (Zirkonya Esaslı Tüp) Üretimi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Metalürji Mühendisliği, 170, Sakarya.
- Tortum, A. Çelik, C. and Aydın, A. C. 2005. Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete, *Building and Environment*, 1(40), 1492-1504.
- TS EN 12597. 2014. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar – Terimler ve Tarifler. Türk Standartları Enstitüsü, 9, 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.
- 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.
- Tunç, B. 2009. Atık Lastiklerin Yönetimi ve Monofillerdeki Fiziksel ve Kimyasal Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Gebze, 78, Kocaeli.
- Türer, A., Gölalınış, M., 2005. Kullanılmış araba lastiği ile ard germe uygulayarak yığma duvarların düzlem dışı dayanımının iyileştirilmesi, Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Kocaeli Üniversitesi, 1541, Kocaeli.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Scrap Tire Technology and Markets. William Andrew Publishing/Noyes, 92-115, USA.
- Uşar, Ü. 2007. Polipropilen Fiber Katkılı Yoğun Bitümlü Karışımların Tekrarlı Sünme Deneyindeki Reolojik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 180, Eskişehir.
- Uzun, B. B. Pütün, A. E. and Pütün, E. 2006. Fast pyrolysis of soybean cake: Product yields and compositions. Bioresource Technology, 97(1), 569-576.
- Üçgöl, I. ve Akgöl, G. 2010. Biyokütle Teknolojisi. Yekarum dergi, 1(1), 3-11.
- Vagkopoulou, T. Koutayas, S. O. Koidis, P. and Strub, J. R. 2009. Zirconia in dentistry: Part 1. Discovering the nature of an upcoming bioceramic. Eur J Esthet Dent, 2(4), 51-130.
- Wang, H. Lu, G. Feng, S. Wen, X. and Yang, J. 2019. Characterization of bitumen modified with pyrolytic carbon black from scrap tires. Sustainability, 11(6), 1631.
- Whiteoak, D. 2004. Shell Bitüm El Kitabı. İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.ř., 28-248, İstanbul.
- Xiao, F. Amirkhanian, S. and Juang, C.H. 2007. Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(6), 475-483.
- Xiao, F. Amirkhanian, S. N. Putman, B. J. and Juang, H. 2012. Feasibility of Superpave gyratory compaction of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement. Construction and Building Materials, 27, 432-438.

- Ye, C. and Chen, H. 2009. Study on road performance of nano SiO₂ and Nano TiO₂ modified asphalt. *New Building Materials*, 6, 027.
- Yıldırım, Y. 2007. Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 21, 66-72.
- Yılmaz, M. 2011. Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 330, Elazığ.
- Yi, J. Cao, Y. Feng, D. and Huang, Y. 2016. Characterization of zirconium tungstate filler and performance investigation on asphalt mastic made with zirconium tungstate filler. *Construction and Building Materials*, 125, 387-397.
- Zaniewski, J. P. and Pumphrey, M. E. 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. West Virginia University, 109, Morgantown.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Mustafa AKBULUT
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 1994 Erzurum
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 5439138212
e-mail : mustafa199425@hotmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2017
Lise	Tevfik İleri Anadolu Lisesi (Erzurum)	2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Erzurum 112 Acil Çağrı Merkezi 2020.
Samsun Büyükşehir Belediyesi 2020- Devam ediyor.

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

Hakemli Dergiler

Ulusal Kongre Sunum

Uluslararası Kongre Sunum