

## ATIK MOTOR YAĞI MODİFİYELİ BİTÜMÜN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İslam GÖKALP<sup>1\*</sup>, Ali Uğur YILDIZ<sup>2</sup>, Muhammed Burak EREN<sup>3</sup>, Volkan Emre UZ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Araştırma Görevlisi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3198-3508>

<sup>2</sup> Lisans Öğrencisi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9755-7328>

<sup>3</sup> Lisans Öğrencisi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-3934-5351>

<sup>4</sup> Doçent Dr. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9328-4756>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.571513>

Anahtar Kelimeler	Öz
Bitümlü Bağlayıcılar, Atık Motor Yağı, Bitüm Modifikasyonu, Geri Dönüşüm, Viskozite.	<i>Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji ile birlikte önemli miktarda evsel/endüstriyel atık ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birisi de gelişen ve büyüyen otomotiv sektörüne paralel olarak ortaya çıkan atık motor yağlarıdır (AMY). Bertaraf edilmediği takdirde AMY'ler hem insan hem de çevre sağlığı için büyük risk teşkil etmekte ve ekosistemi olumsuz etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, gerek ülkemizde gerekse tüm dünyada çok büyük miktarlarda açığa çıkan AMY'lerin bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 70/100 penetrasyon sınıfından bitüme %1 ile %5 arasında değişen 5 farklı oranda AMY standart bir metot ile karıştırılarak eklenmiş, bitüm modifiye edilmiştir. Yapılan modifikasyon neticesinde bitümde meydana gelen değişimler penetrasyon, yumuşama ve parlama noktası ve viskozite gibi temel mühendislik özellikleri üzerinden incelenmiştir. Aynı zamanda, bitümün AMY ile modifiye edilmesi sonrası bitümdeki sıcaklık hassasiyetinin ve karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının nasıl değiştiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, farklı oranlarda AMY katkısı kullanılarak modifiye edilen bitüm numunelerinin temel mühendislik özelliklerinde belirgin bir değişim olduğu görülmüştür. Bitümlerin temel mühendislik özellikleri üzerinde yapılan ilk değerlendirmelere göre AMY'nin bitüm modifikasyonunda kullanılarak geri kazanılmasının mümkün olabileceği öngörülmüştür.</i>

## INVESTIGATION ON ENGINEERING PROPERTIES OF WASTE ENGINE OIL MODIFIED BITUMEN

Keywords	Abstract
Bituminous Binders, Waste Engine Oil, Bitumen Modification, Recycling, Viscosity.	<i>With increasing world population and developing technology, a significant amount of domestic/industrial waste is emerging. One of them is waste engine oils (WEO) that increases in amount day by day in parallel with developing and growing automotive sector. If not disposed of, WEO poses a great risk to both human and environmental health and may affect the ecosystem, adversely. In this study, it was investigated the availability of WEO, which were emerged in a significant amount in our country and all over the world, in the modification of bituminous binders. For this purpose, pure bitumen with 70/100 penetration class was modified by mixing WEO with 5 different rate ranging from 1% to 5% using a standard method. As a result of the modification, changes in basic engineering properties of the bitumen were examined based on the tests such as penetration, softening and flash point and viscosity. At the same time, the changes in sensitivity to temperature and in mixing and compaction temperatures of WEO modified bitumen were revealed. Moreover, modification index was identified for each test methods. As a result, it was seen that there was a significant change in the basic engineering properties of bitumen samples using different rate of WEO. Increase in value of penetration and decrease that of softening, flashing point and viscosity were revealed. Based on the initial assessments on the basic engineering properties of bitumen, it is envisaged that WEO can be recycled using in bitumen modification.</i>

\* Sorumlu yazar; e-posta : [islamgokalp@gmail.com](mailto:islamgokalp@gmail.com)

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 29.05.2019	Submission Date	: 29.05.2019
Kabul Tarihi	: 02.09.2019	Accepted Date	: 02.09.2019

## 1. Giriş

Yol esnek üst yapısının kütlece %4 ile 7'si bitümlü bağlayıcılardan kalan miktarı da katkı ve agregalardan oluşmaktadır. Agregalar, kaplamanın iskeletini oluşturarak kaplamaya belli bir hacim kazandırmakta iken bitümlü bağlayıcılar, agregaları bir arada tutmakta, agregalar arasındaki boşluğu doldurmada ve üretilen sıcak karışımın işlenebilirliğini sağlamaktadır (Di Benedetto, Olard, Sauzéat ve Delaporte, 2004). Bitümlü bağlayıcılar, her ne kadar kaplamada oranı kütlece az olsa da inşa edilen yol üst yapısının hem yapısal hem de fonksiyonel performansı üzerinde oldukça önemli bir role sahiptir. Sıcak karışım imalatı sırasında uygun tür ve miktarda kullanılmayan bitümlü bağlayıcılar, hem inşa sırasında hem de inşa sonrasında kaplamada yapısal hataların ortaya çıkmasına neden olur (Ayçiçek, 2011). Uygulamadaki hatalar yol ömrünü azaltırken üstyapının bakım ve onarım maliyetlerini de artmasına yol açar (Giavarini, 1994).

Bitümlü bağlayıcılar orjinal formlarıyla uzun yıllar yol kaplama imalatında kullanıldığı bilinmektedir. Zamanla trafiğe çıkan araçların sayısının ve yoldan beklenen güvenlik ve konfor seviyesinin artmasıyla, üstyapıdan beklenen performansın maksimize edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, yol üstyapısında meydana gelebilecek bozulmaların en aza indirilmesi veya geciktirilmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda, üretilecek üstyapının yüksek dayanıma sahip olması, buna istinaden bakım ve onarım maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Belirlenen amaçlar doğrultusunda bir çok çalışma yapılmış ve bu çalışmaları, genellikle, yol kaplamasında kullanılacak malzemelerin karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine olmuştur. Bu çalışmalar neticesinde çevrenin ve olağan trafik yüklerinin zorlayıcı koşullarına karşı malzemelerden daha yüksek dayanım ve/veya performans beklenmiştir. Bu beklentiler, ayrıca teknik şartnamelere ile güven altına alınmıştır (Lesueur, 2009). Bitümün orijinal haliyle yapılan çalışmalardan, üstyapıdan beklenen performansın yakalanamayacağı görülmüş, bu tür malzemelerin amaca yönelik olarak modifikasyonunun gerekliliği üzerinde durulmuştur (Sengoz, Topal ve Isikyakar, 2009; Topal, 2010; Topal, Yılmaz, Kok, Kuloglu ve Sengoz, 2011; Oner, Sengoz, Rija ve Topal, 2017). Bu doğrultuda, gerek ticari ürünlerin gerekse de endüstriyel/evsel atıklarının bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanımı konusunda birçok araştırma (Masson, 2008; Fang, Yu, Liu ve Li, 2013; Presti, 2013; Polacco, Filippi, Merusi ve Stastna, 2015; Gökalp, Özinal ve Uz, 2018) yapılmış, malzemelerin bitüm özelliklerinde meydana getirdikleri değişimler bu çalışmalarda raporlanmıştır.

Her geçen gün dünya nüfusu artmakta ve teknoloji gelişmektedir. Teknolojinin ve tasarımın önemli oranlarda geliştiği/değiştiği sektörlerden biri otomotiv sektörüdür. Gelişen ve değişen koşullar, imkânlar nezdinde bireylerin araç sahipliğinin artmasına sebebiyet vermiştir. Türkiye otomobil dağıtıcıları derneği tarafından yayınlanan bir raporda, 2019 yılı ilk dört ayında satışı yapılan otomobil ve hafif ticari araçların sayısının yaklaşık 120.000 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Avrupa Birliği ve Avrupa Serbest Ticaret Birliği üyesi ülkeler için satışların yaklaşık 6,5 milyon adedi bulunduğu, dünya genelinde ise 100 milyon adedi aştığı rapor edilmiştir (ODD, 2019).

Bilinmektedir ki, hafif binek araçların yanı sıra ağır yüklü araçların (otobüs, kamyon, iş araçları vb.) belli bir süre kullanılmaları sonucunda yıpranması söz konusudur. Bu nedenle, araçların yürüyen aksamlarının yanı sıra motor gibi yürütücü aksamlarının düzenli bir şekilde bakıma/onarımdan geçirilmesi gerekmektedir. Motor bakımında öncelikli olarak yağın seviyesine; kirlilik oranına ve kullanılan yağın uyumuna bakılmaktadır. Neticede, mevcut motor yağının değişimi yapılmaktadır. Değişim sırasında kullanılmış motor yağı, ya atık olarak depolanmakta veya ilgili usul ve esaslara uygun olarak bertaraf edilmektedir (PETDER, 2017). Nispi seviyede olsa da, kullanılmış motor yağlarının geri dönüşümü yapılabilmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan bir raporda, ülkemizde yıllık yaklaşık 450.000 ton madeni yağın piyasaya sürüldüğü ve bu yağların yaklaşık 250 bin tonunun atık yağ olarak ortaya çıktığı ve maalesef bunların ancak 40.000 tonunun farklı amaçlar doğrultusunda geri kazanılabildiği ifade edilmiştir (CSB, 2019). 2017 yılında yayınlanan raporda yaklaşık 20.000 ton atık motor yağının (AMY) toplandığı ifade edilmiştir. Geriye kalan AMY'ler ise genellikle soba ve kazanlarda ısıtma, akaryakıt sektöründe ilave yakıt amaçlı kullanılmaktadır (Bolat, Can-Güven, Gedik ve Kurt-Karakuş, 2016). Ancak, kullanımları sonrasında ekotoksit özelliğe sahip olan AMY'ler çevre ve insan sağlığına zararlı olan ağır metaller içerir, yakılmaları ile de atmosfer kirliliğine sebep olmaktadır (Gökalp ve diğ., 2018). Bu nedenle AMY'lerin çevre ve insan sağlığı için zararlı olmayacak şekilde bertaraf edilmesi veya farklı yararlı amaçlar doğrultusunda geri kazanılması büyük önem arz etmektedir. Öyle ki, atık yağların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi ile hem toplum ve çevre sağlığı açısından önemli faydalar oluşacak, hem de yararlı amaçlar doğrultusunda geri kazanımları neticesinde ilgili kişi/kurum ve ülkeler nezdinde büyük ekonomik

kazanımlar elde sağlanacaktır (Asli, Ahmadinia, Zargar ve Karim, 2012; Taherkhania ve Farid Noorianb, 2018).

Sadece ülkemiz değil diğer tüm dünya devletleri sınırlı doğal/yapay kaynaklara sahiptir. Bu nedenle, sınırlı kaynakların daha efektif kullanılması, kullanılan kaynakların geri kazanılması ve bunun sürdürülebilir olması oldukça önemli bir konu olarak karşımıza çıkmıştır. Kaynak kullanım sonrasında oluşacak atıklarının çevre ile uyumlu alternatif uygulamalarda kullanılabilirliği ve geri kazanılabilirliği son zamanlarda üzerinde durulan en önemli konulardan biri olmuştur (Akdoğan ve Güleç, 2007; Glavič ve Lukman, 2007; Reuter, 2011; Bayraktutan ve Sefer, 2011; Mayyas, Qattawi, Omar ve Shan, 2012; İpeçi, Coşkun ve Karadayı, 2015).

Bitüm, petrol üretim sonrasında ortaya çıkan oldukça değerli, sınırlı ve pahalı bir yapı malzemesidir. Çok farklı amaçlar için kullanılabilen bitümün, kullanım sonrasında yine benzer/farklı amaçlar doğrultusunda atık bitümün kullanılabilirliği yönünde geri kazanılması yukarıda anılan sosyo-ekonomik faydalar doğuracaktır. Yukarıda ifade edildiği gibi azımsanmayacak miktarda açığa çıkan AMY'lerin bitümlü bağlayıcılar ile kullanılması ve bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkisi bu minvalde araştırma konusu olmuştur, birçok çalışma (Hesp ve Shurvell, 2010; Dedene, Mills-Beale ve You, 2011; Rubab, ve diğ., 2011; Johnson ve Hesp, 2014) belirtilen hususlar çerçevesinde yapılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmalarda, AMY'nin bitümün kimyasal kompozisyonunu, reolojik ve temel mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiğini anlamaya çalışılmıştır. Bunların yanı sıra, bitümlü sıcak karışımların (BSK) hazırlanmasında AMY katkılı bitümlerin yol kaplamasının yapısal ve fonksiyonel özelliklerinde meydana gelen değişimler de ortaya konmuştur.

Bu çalışma kapsamında, AMY'lerin bitümlü bağlayıcılar üzerinde etkisini ortaya koyarak potansiyel geri kazanımına yönelik bir araştırma yapılmıştır. Sunulan bu çalışmada, 70/100 penetrasyon sınıfından bitüme, oto tamir-bakım atölyelerinden temin edilen AMY'lerin %1 ile %5 arasında birer birim artarak değişen oranlarda ilave edilmiş, bitüm modifiye edilmiştir. Elde edilen modifiye bitümün temel mühendislik özellikleri bir dizi test yöntemi (penetrasyon, yumuşama, parlama noktası ve viskozite testi) kullanılarak ile belirlenmiştir. Aynı zamanda, penetrasyon indeksi kullanılarak bitüm numunelerinin sıcaklığa karşı hassasiyetleri ortaya konulmuştur. Farklı sıcaklıklarda yapılan viskozite ölçüm sonuçlarından bitüm numunelerinin karıştırılma ve sıkıştırılma sıcaklıkları belirlenmiştir.

## 2. Materyal

Bu çalışma kapsamında, Karayolları Genel Müdürlüğü Adana Bitüm Şefliğinden 70/100 penetrasyon sınıfına

sahip bitüm numuneleri temin edilmiştir. Temin edilen bitümün temel mühendislik özellikleri ilgili ASTM standartlarına göre bir dizi test ile belirlenmiştir (Tablo 1). Çalışmada kullanılan AMY, Adana Organize Sanayi Bölgesi'nde ticari faaliyet gösteren oto tamir-bakım işletmelerinden temin edilmiştir. AMY'ye ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler, önceki çalışmalar ışığı altında araştırılmış (Borhan, Suja, Ismail ve Rahmat, 2009; Liu, Peng, Wu ve Zhou, 2018) ve Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1

Bitümün mühendislik özellikleri

Deney Yöntemi	Standart	Birim	Sonuç
Penetrasyon	ASTM D5	0,1 mm	76,2
Yumuşama noktası	ASTM D36	°C	49,0
Parlama Noktası	ASTM D92	°C	259,0
Düktilitite (25°C)	ASTMD113	cm	104,3
Viskozite 135 °C'de	ASTM D4402	cP	517,5
Viskozite 165 °C'de			139,2

Tablo 2

Atık motor yağının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal İçerik	Oran (%)	Fiziksel Özellikler	Değer
Nitrojen	20-30	Özgül ağırlık(g/cm <sup>3</sup> @ 25°C)	0,80-0,90
Karbon	10-15	Parlama noktası (°C)	120-200
Sülfür	0,1-1,0	Viskozite (cP, @ 40°C)	20-90
Oksijen	40-50	Viskozite (cP, @ 100°C)	4-20
Hidrojen	0,1-0,5	Kızdırma kaybı (%@ 100°C)	1,5-4,0
Kalsiyum	0,1-0,-5	Kirlilik Oranı (%)	2-4
Krom	0,2-1,0	Renk	Siyah
Bakır	0,2-1,0	-	-
Demir	1,0-5,0	-	-
Kurşun	0,2-2,0	-	-
Arsenik	0,01-0,2	-	-
Nikel	0,1-2,0	-	-

Tablo 2'de görüleceği üzere, toplum ve çevre sağlığına zararlı etkileri olan ağır kimyasal metaller, AMY içerisinde bulunmaktadır. Dolayısıyla, AMY'ler etkili ve güvenli bir şekilde bertaraf edilmeli ve/veya geri sağlıklı bir şekilde geri kazanılmalıdır. Bu hususta gerek yerelde gerekse genelde söz sahibi tüm yönetimler tarafından gereği üzerinde durulması gereken sosyal ve ekonomik bir sorumluluktur. Ayrıca, AMY'lerin viskozite değerleri ve parlama noktasının bitüme oranla daha düşük kaldığı görülecektir.

### 3. Yöntem

#### 3.1. Bitüm Modifikasyonu

Temin edilen bitüm numunelerine bitüm ağırlığına belirlenen oranlarda (%1'den %5'e kadar) AMY ilave edilmiş ve modifikasyon gerçekleştirilmiştir.

Modifikasyonda takip edilen işlem dizisi; (a) Bitümün  $145 \pm 5$  °C ısıtılması, Bitümün 500 gramlık miktarlarda kaplara boşaltılması, (b) Bitüme belirlenen oranlarda AMY katkısının ilave edilmesi, (c) Bitüm-AMY karışımının  $140 \pm 5$  °C ısı altında dakikada 1000 devir ile yarım saat boyunca karıştırılması şeklindedir.

Çalışmada kullanılan ve modifikasyon parametreleri ve grafik ile şekillerde ifade edilen numune kodlarının açılımını gösteren bir tablo hazırlanmış, aşağıda verilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3

Numune kodları ve modifikasyon parametreleri

No	Numune Kodu	Modifikasyon Parametreleri
1	SB	Saf bitüm
2	AMY-1	Saf bitüm + %1 AMY
3	AMY-2	Saf bitüm + %2 AMY
4	AMY-3	Saf bitüm + %3 AMY
5	AMY-4	Saf bitüm + %4 AMY
6	AMY-5	Saf bitüm + %5 AMY

#### 3.2. Deneyler ve Analizler

Bu çalışmada, farklı oranlarda AMY ilavesiyle elde edilen modifiye bitümlerin temel mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, bitümde meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve parlama noktası deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde anılan deney yöntemleri kısaca özetlenmiştir.

##### 3.2.1. Penetrasyon Testi

Yarı katı ve/veya katı formda olan bitümlü bağlayıcıların oda koşullarında (25 °C) veya araştırma sıcaklığında kıvamının veya sertlik derecesinin standart bir yük (100 veya 200 gr) ve belli bir süre için standart bir iğnenin numuneye batma derinliğinin belirlenmesine dayanan bir testtir. Yüksek penetrasyon değeri, bitümün düşük kıvamlı olduğunu ifade ederken düşük penetrasyon değerleri ise malzemenin yüksek kıvamlı veya yüksek sertlik derecesine sahip olduğunu gösterir. Deney sonuçları, milimetrenin 10'da biri (0,1 mm) olarak okunur. Bu çalışma kapsamında ASTM D5

standartı takip edilerek deneyler iki adet numune üzerinden yapılmış, ortalama sonuçlar sunulmuştur.

##### 3.2.2. Yumuşama Noktası Testi

Standart bir geometriye sahip halka içerisinde dökümü yapılan bitüm numunelerinin, belirli ısı koşullar ve bir bileye yüklemesi altında, tanımlan miktarda akmasına dayanan bir testtir. Bitümler üzerinde yapılan yumuşama noktası deneyi için ASTM D36 standardı takip edilmiştir. Bu test yöntemi ile bitümün ısıya karşı duyarlılığı tayin edilir. Deneylerden elde edilen sonuç °C olarak verilir.

##### 3.2.3. Viskozite Testi

Bitüm, visko-elastik bir malzeme olmakla beraber ısıya karşı duyarlıdır. Düşük ısılarda katı-yarı katı formda olabilen bitümlü bağlayıcılar yüksek ısılarda ise viskoz yani akışkan durumdadır. Farklı sıcaklar altında akmaya karşı direncinin ölçülmesi, bitümün işlenebilirliğine dair önemli bilgiler vermektedir. Bitümün akmaya karşı direncini yani viskozitesini farklı yöntemler ile ortaya koymak mümkündür. Ancak, yüksek sıcaklıklarda viskozitenin ölçülmesinde, yaygın olarak Brookfield dönel viskozimetreye dayanan test kullanılmaktadır. Bu test yöntemi, ısı bir hücre içerisinde standart bir kapta belli miktarda bitümün belirlenen sıcaklıklarda koşullandırılmasına ve sonra standart bir milin numuneye daldırılıp ve numune içinde dönmeye karşı kuvvetinin belirlenmesine dayanır. Viskozitenin ölçüm birimi centipoise (cP) cinsinde ifade edilir. Bu çalışmada kapsamında, tüm bitüm numunelerinin viskozite değerleri ASTM D 4402 standardı takip edilerek üç farklı sıcaklıkta (110, 135 ve 165 °C) ölçülmüştür. Ayrıca, çalışma kapsamında 135-165 °C'de viskozite ölçüm sonuçları kullanılarak, bitümün sıcak kaplama imalatında işlenebilir karıştırma ve sıkıştırılma sıcaklıkları tayin edilmiştir.

##### 3.2.4. Parlama Noktası Testi

Bitüm parlama noktasının belirlenmesi, iş ve işçi sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu deney yöntemi ile bitümün uçucu ve yanıcı bileşenlerinin hangi sıcaklıkta yoğunlaşacağını ve olası herhangi bir (kibrit, çakmak, elektrik vb.) kaynaktan oluşacak ateş kaynağının sebep olabileceği parlama ısı belirlenebilmektedir. Çalışma kapsamında temin edilen saf bitümün parlama sıcaklığı minimum 230 °C olduğu rapor edilmiş, yapılan deney ile parlama noktasının 259 °C olduğu görülmüştür. Ancak, incelenen raporlarda atık yağ için parlama noktasının maksimum 235 °C olduğu, ancak TS 12153 standardında ifade edilen kalite faktörüne ilişkin de bu değer minimum 100 °C olacağı görülmektedir. Dolayısıyla, farklı kimyasal ve fiziksel

özelliklere sahip iki malzemenin kullanılması ile elde edilen yeni bir malzemenin de parlama noktasının değişeceği öngörülmüştür. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, parlama noktası tayini için açık Cleveland kapı aparatı kullanılmış, ASTM D92 takip edilerek deneyler yapılmıştır. Deney sonucu, parlama sıcaklığı ile ifade edilmekte ve birimi °C olarak verilmektedir.

### 3.3. Sıcaklığa Karşı Hassasiyet Analizi

Bitümlü bağlayıcılar, sıcaklık ile katıdan sıvıya; sıvıdan katıya dönüşebilen bir visko-elastik bir malzemedir. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerini ortaya koymak amaçlı geliştirilen birçok indeks mevcuttur. Bu indekslerden biri penetrasyon indeksidir (PI). Bu indeks, bitümün sıcaklığa karşı davranışını belirlemek için kullanılan nicel bir ölçüttür. Bu indeks Amerikan Stratejik Karayolu Araştırma Programı, SHRP (Anderson ve diğ., 1994) tarafından geliştirilen standart penetrasyon testi ve yumuşama noktası test sonuçlarının kullanıldığı bir formül ile hesaplanır (Denklem 1). Penetrasyon değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters bir orantı söz konusudur. Yani, penetrasyon indeksi arttıkça, ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır (Kuloğlu, Yılmaz ve Kök, 2008).

$$PI = \frac{1952 - 500 \log Pen - 20SP}{50 \log Pen - SP - 120} \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte,

Pen: 25 °C 'de yapılan penetrasyon testi sonucunu,

SP: Yumuşama noktası testi sonucu ifade etmektedir.

### 3.4. Modifikasyon İndeksi Analizi

Bu çalışma kapsamında farklı oranlarda AMY katkısı eklenerek modifiye edilen bitümler oluşan değişim, her bir deney yöntemine incelenmiştir. Bu doğrultuda, aşağıda verilen formül (Denklem 2) ile modifikasyon indeksi hesaplanacaktır.

$$MI = \left| \frac{MBi}{SBi} - 1 \right| \times 100 \quad (2)$$

Burada,

MI: Modifikasyon indeksini,

MB: Modifiye bitüm test sonucunu,

SB: Saf bitüm test sonucunu ve

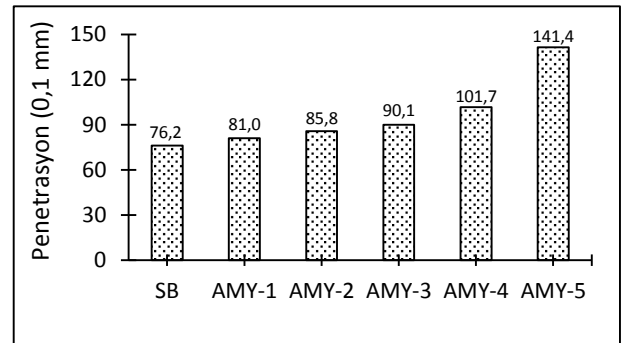
i ise AMY oranını ifade etmektedir.

## 4. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bu bölümünde, ayrı ayrı alt başlıklar altında öncelikle penetrasyon, yumuşama ve parlama noktası test sonuçları verilmiş ve test sonuçları üzerinde tartışılmıştır. İkinci alt başlık altında Brookfield dönel Viskozimetre farklı sıcaklıklarda elde edilen dinamik viskozite ölçüm sonuçları ve bu sonuçlarla tayin edilebilen bitümün plentte agrega ile karıştırılma ve BSK'nın sahada sıkıştırılma sıcaklarına ait sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak bitümün sıcaklık hassasiyetinin ortaya konulması amacıyla geliştirilen analiz yöntemlerine yer verilerek, sayısal sonuçlar paylaşılmış ve hesaplanan sonuçlar yorumlanmıştır.

### 4.1. Penetrasyon, Yumuşama ve Parlama Noktası Testi Sonuçları

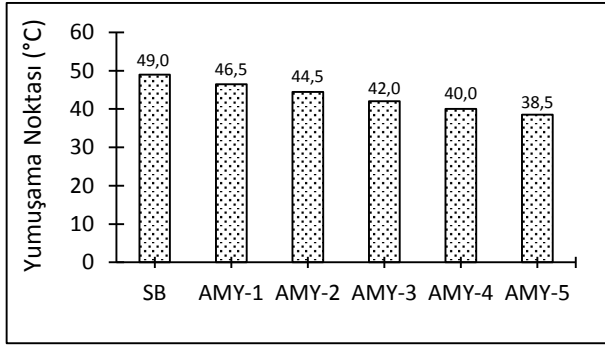
70/100 penetrasyon sınıfına sahip bitüm numunesinin AMY ile farklı oranlarda modifiye edilmesi neticesinde elde edilen numuneler üzerinde yapılan penetrasyon testine ait sonuçlar Şekil 1'de, bitümün diğer temel mühendislik özelliklerinden olan yumuşama noktasına ait test sonuçları ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Penetrasyon testi sonuçları

Şekil 1'de verilen sonuçlar incelendiğinde, bitüme eklenen AMY oranının artması ile penetrasyon değerinde önemli miktarda bir artışın söz konusu olduğu görülecektir. Penetrasyon sınıflandırma sistemine göre %3'e kadar olan oranda AMY ile modifiye edilen bitüm, saf bitüm sınıfı (70/100) içerisinde kaldığı görülmektedir. Ancak, %4 ve 5 oranında AMY içeren modifiye bitümlerin mevcut bitümün sınıfını değiştirmektedir. Belirtilen oranlarda AMY modifiye bitüm numuneleri 100/150 bitüm sınıfı penetrasyon değerlerini sağlamaktadır. Ayrıca, %3'lük orana kadar AMY'nin her bir birim artması ile yaklaşık olarak 5 birimlik penetrasyon artışının meydana geldiği, ancak %4'te artış miktarının %3'e göre 10 birim, %5'te ise artış miktarının %4'e oranla 30 birim olduğu ortaya koymak mümkündür.

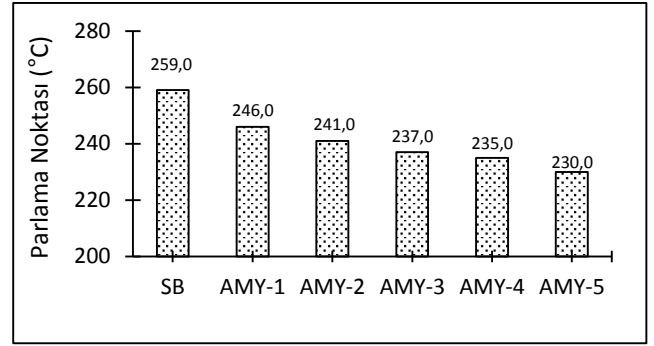
Yumuşama noktası testinden elde edilecek sonuçlarının penetrasyon testi sonuçları ile ters orantılı olacağı bu çalışmanın materyal ve metot bölümünde ifade edilmişti. Dolayısı ile yumuşama noktası testi sonuçlarından beklenen, penetrasyon testi sonuçlarında artışın tersine bir durumun oluşmasıdır



Şekil 2. Yumuşama noktası testi sonuçları

Şekil 2'deki sonuçlar incelendiğinde yukarıda anılan beklenen durumun olduğu görülecektir. Öyle ki, AMY katkı oranı arttıkça modifiye edilen bitümlerin yumuşama noktasında belirgin bir düşüş meydana gelmektedir. Ayrıca, bir birim AMY oranının artışı ortalama olarak 2°C kadar yumuşama noktasında düşüşe neden olmuştur.

Bitüm, uçucu ve yanıcı bileşenlere sahip olan bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda sıvılaştıran ve uçucu bileşenleri açığa çıkan ve yüzeyde toplanan bitümlü bağlayıcıların herhangi bir ateş kaynağı ile teması neticesinde bir parlama/patlama veya alevlenme söz konusu olabilir. Bu nedenle hem iş hem de işçi sağlığı ve güvenliği açısından bitümün parlama noktasının ortaya konulması önemlidir. Minimum 230 °C'ye sahip olan bitüm numunesine farklı parlama sıcaklıklarına sahip numunelerin ilave edilmesiyle oluşacak modifiye bitümlerin parlama noktası azalan veya artan yönde olabilmektedir. Yukarıda ifade edilen kaygılar göz önünde bulundurularak, farklı oranlarda AMY katkısı içeren modifiye bitüm numunelerinin parlama noktasının tayin edilmiş, test sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur.

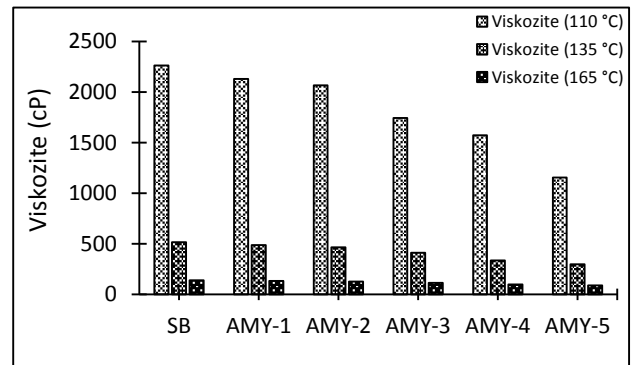


Şekil 3. Parlama noktası testi sonuçları

Şekil 3'te paylaşılan parlama noktası test sonuçları, farklı oranlarda AMY ile modifiye edilen bitümlerin parlama noktalarının 30 °C'ye kadar düşüş olduğunu ortaya koymuştur. %5 AMY ile modifiye edilen bitümün çoğu bitüm numunesi için TS EN 12591 standardında tanımlanan sınır değere, 230 °C'ye, ulaştığı görülmüş, buna göre, bitüm modifikasyonunda AMY katkısının %5 oranının üzerinde kullanılacak olması güvenlik açısından bir zafiyet doğuracağı ön görülebilir. Bu nedenle, %5 ve sonrasındaki oranlarda AMY'lerin bitüme ilavesi ile elde edilen modifiye bitümlerin güvenlik açısından denetlenmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

#### 4.2. Viskozite Test Sonuçları

Bitümlü bağlayıcılar visko-elastik bir malzeme olup sıcaklığa karşı oldukça hassas davranmaktadır. Düşük sıcaklıkta yarı-katı veya katı formunda olan bitüm elastik özellikte iken, yüksek sıcaklıklarda ise sıvı formda akışkan bir hal almaktadır. Farklı sıcaklıklar altında (110, 135 ve 165 °C) viskozite, yani akmaya karşı direnç değerlerini belirlemek için Brookfield dönel viskozimetre kullanılmış, tüm saf ve AMY modifiye bitümler üzerinde 3'er tekrar olmak üzere uygulanmıştır. Test ortalama sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.

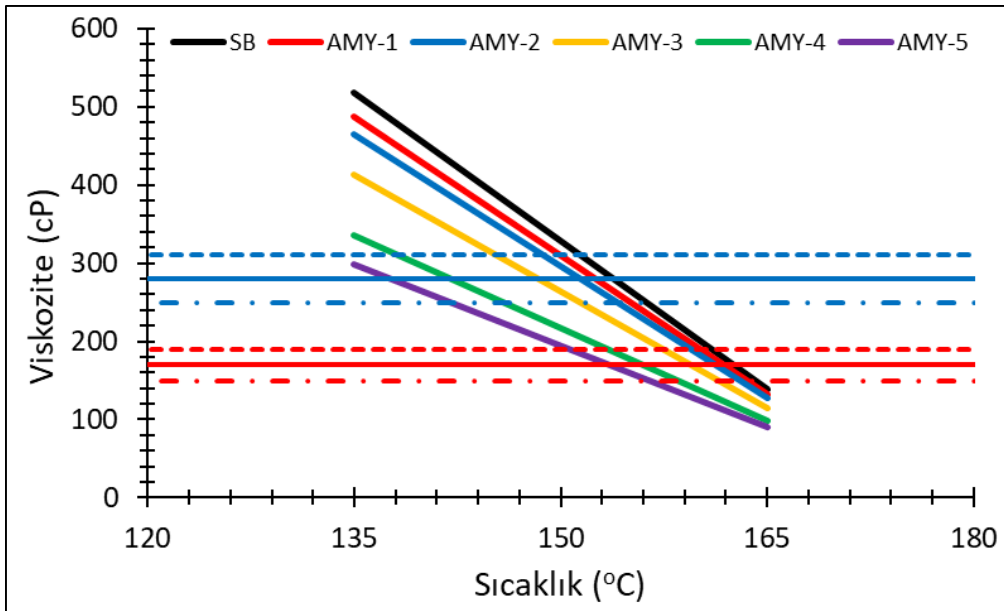


Şekil 4. Viskozite testi sonuçları

Şekil 4’de görüldüğü üzere 110 °C’deki sıcaklıklarda, tüm numuneler için viskozite değeri yüksek görülmüştür. Ancak, AMY katkılı modifiye bitümlerde ölçülen viskozite değerleri, saf bitümünkine oranla daha düşük seviyede kalmıştır. Yanı sıra, AMY oranı arttıkça viskozitedeki düşüş daha da belirginleşmektedir. Diğer sıcaklıklarda ( 135 ve 165 °C) da benzer eğilim görülmektedir. Yalnız, yüksek sıcaklıklarda yapılan ölçümler arasında, düşük sıcaklıklarda yapılanınkilere göre büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Örnek olarak, 165 °C’de saf bitüm için yapılan viskozite ölçümlerinde 139 cP değerine ulaşılmışken %5 AMY katkılı modifiye bitümde bu değer 90 cP olarak belirlenmiştir. Ancak, 110 °C’deki viskozite değerlerine bakıldığında saf bitüm için bu değer 2263 cP ölçülmüş, %5 AMY katkılı modifiye bitümünki ise 1154 cP olarak ortaya konmuştur.

#### 4.3. Bitümlü Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları

Viskozite deneylerinin yapıldığı ilgili ASTM standardında, işlenebilir bir bitümlü sıcak karışımın sağlanması ve karışımın inşaat sahasında kolaylıkla serilip sıkıştırılabilmesi için bitümün sağlanması gereken viskozite limit değerleri tanımlanmıştır. Bu değerler, karıştırma için  $170 \pm 20$  cP iken, sıkıştırma için ise  $280 \pm 30$  cP’ dur. Bu çalışmada, 135 ve 165 °C’deki sıcaklıklarda ölçülen viskozite değerlerinden limit değerlere karşılık gelen sıcaklık değerleri Şekil 5’de verilen grafik üzerinde belirlenmiş, alt ve üst limit viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerine ait sayısal sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 5. Saf ve AMY modifiye bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı grafiği

Tablo 4

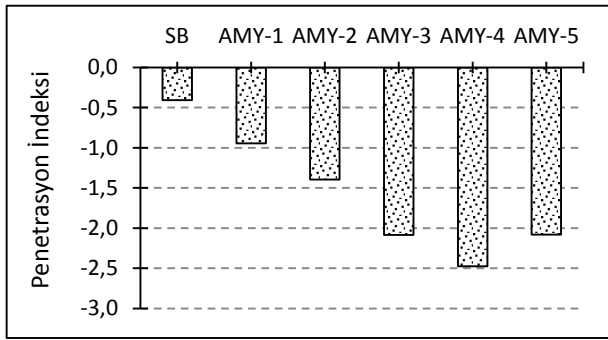
Saf ve AMY modifiye bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Numune Kodu	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)
SB	156,2 - 151,5	164,1 - 160,9
AMY-1	155,0 - 149,9	163,5 - 160,1
AMY-2	154,1 - 148,8	163,0 - 159,4
AMY-3	151,3 - 145,3	161,4 - 157,3
AMY-4	145,9 - 138,3	158,5 - 153,4
AMY-5	142,1 - 133,5	156,4 - 150,7

Şekil 5 ve Tablo 4 açıkça görüldüğü üzere bitümdeki AMY katkı oranının artması ile sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarında yaklaşık olarak 10-15 °C düşüş meydana gelmektedir. Sonuçlara göre saf bitümün sıkıştırma sıcaklığı 156-151 °C arasında iken, %5 oranında AMY katkılı bitüm numunelerinde ise 142-133 °C arasında belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklıklarında da benzer durum hâsıl olmuştur. Sayısal olarak incelendiğinde, saf bitüme ait karıştırma sıcaklığı 164-161 °C’dir. Ancak, %5 oranında AMY katkılı bitüm numunelerinin karıştırılma sıcaklık değeri ise 156-150 °C arasında görülmüştür.

#### 4.4. Bitümün Sıcaklığa Karşı Hassasiyeti

Bitümlü bağlayıcılar, sıcaklığa karşı hassas yapı malzemelerindedir. Bitümün sıcaklık hassasiyetlik derecesi, sahip oldukları kimyasal bileşenlerinden, üretim sürecinden ve içerdiği katkı ve katkı oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu tür malzemelerin sıcaklık hassasiyetlerinin ortaya konmasında geliştirilen bir takım yöntemler, indeksler mevcut olmakla beraber, günümüz çokça kullanılan hesaplama yöntemlerinden biri penetrasyon indeksidir. İndeks hesaplanmasında, bitümün sahip olduğu penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden yararlanılır. Çalışmamızda, saf bitüm dâhil AMY katkılı her bir modifiye bitüm numunesi için PI değerleri hesaplanmış ve hesaplanan sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Saf ve AMY modifiye bitümün PI değerleri

Bitümlerin asfalt kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılabilmesi, PI değerlerinin -2 ile 2 arasında olmasını gerektirmektedir. Metot kısmında da ifade edildiği üzere PI ile yapılan değerlendirmede referans PI değeri -2 kullanılmaktadır. PI değerinin -2'den küçük olması durumunda ilgili bitümün ısıya karşı duyarlılığının fazla olduğu sonucuna varılır. Şekil 6'da sonuçlar incelendiğinde, AMY katkılı numunelerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin saf bitüme kıyasla daha yüksek olarak gözlenmiştir. Bunun yanında, %3 AMY katkılı bitüm ile %5 AMY katkılı bitümün sıcaklık hassasiyetlerinin eşit olduğu görülmektedir.

#### 4.5. Modifikasyon İndeksi Analizi

Çalışma kapsamında, her bir test yönteminden farklı oranlarda AMY ile modifiye edilen bitümlerin test sonuçları kullanılarak modifikasyon indeksi (yapılmıştır. Burada amaçlanan, farklı test yöntemlerine göre yapılacak modifikasyon değerlendirilmesinde test yöntemlerinin önemi ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda 2 numaralı denklemi ile modifikasyon indeksi hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 5 verilmiştir.

Tablo 5

Modifikasyon indeksi analiz sonuçları

Numune Kod	Testler ve Mİ sonuçları			
	Penetrasyon	Yumuşama Noktası	Parlama Noktası	Viskozite (135/165 °C)
AMY-1	6,30	5,10	5,01	5,80/ 5,10
AMY-2	12,60	9,18	6,95	10,14/ 8,41
AMY-3	18,24	14,29	8,49	20,29/ 18,25
AMY-4	33,46	18,37	9,27	35,01/ 29,38
AMY-5	85,56	21,43	11,20	42,18/ 35,35

Tablo 5'te verilen Mİ sonuçları incelendiğinde her bir test yönteminin farklı sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Penetrasyon testine dayalı Mİ sonuçları %6,30 ile 85,56 gibi geniş bir aralıkta olurken; yumuşama noktasında 5,10 ile 21,43; parlama noktasında 5,01 ile 11,20 arasındadır. 135 ve 165 °C'deki viskozite değerlerine istinaden hesaplanan Mİ değerlerinin düşük sıcaklıkta daha yüksek olduğu (5,80 ile 42,18 arası); yüksek sıcaklıkta ise bu değerlerin düştüğü (5,10 ile 35,35 arasında) açıkça görülmektedir. Bu verilerden çıkarılacak sonuç, modifikasyon öncesinde ve sonrasında değerlendirme için kullanılacak yöntemin önemini ortaya çıkmasıdır. Daha hassas ve operatör bağımsız test yöntemlerinin bu aşamada kullanılması önerilmektedir.

#### 5. Sonuçlar

Sunulan bu çalışmada, bitüm ağırlığınca %1-%5 oranında birer birim değişen aralıklarda AMY ile modifiye edilen 70/100 penetrasyon sınıfına sahip saf bitümde meydana gelen değişimler, bitümün temel mühendislik özellikleri üzerinden incelenmiştir. Bu doğrultuda penetrasyon, yumuşama, viskozite, parlama noktasını içeren bir dizi test yapılmıştır. Ayrıca, bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini ortaya konulabilmesi amacıyla penetrasyon-yumuşama test sonuçları kullanılarak hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Son olarak, farklı sıcaklıklarda saf ve AMY modifiye bitümler üzerinde yapılmış olan viskozite testi sonuçları kullanılarak, bitümleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenmiştir.

Yukarıda özeti sunulan çalışma sonucunda artan oranda AMY katkısı ile modifiye edilen bitümlerin;

- Penetrasyon değerlerinde artış,
- Yumuşama noktalarında azalış,
- Parlama noktalarında azalış,
- Viskozite değerlerinde azalış,
- Sıcaklığa karşı hassasiyetlerinde artış ve
- Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında azalış,
- Farklı test yöntemleri, farklı oranlarda



modifikasyon indeksi değerleri verdiği görülmüştür.

Saf bitüme oranla daha düşük karıştırma ve serme sıcaklarına sahip olan AMY modifiye bitümlerin, sıcak kaplama imalatında kullanımı ile yüksek sıcaklıklarda ısıtmadan kaynaklı enerji kaybının önüne geçilebileceğini ön görülmektedir. Gerekli enerji miktarının düşürülmüş olması ile önemli oranlarda çevresel ve ekonomik kazanım elde edilebileceği aşikârdır.

## 6. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Bu çalışma, AMY'lerin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile bitüm özellikleri üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada bitümün temel mühendislik özelliklerinin belirlendiği geleneksel test yöntemleri (penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve viskozite) kullanılmıştır.

Bu çalışma ile AMY modifiye bitümlerin reolojisinde, kimyasal içeriğinde, gerek kısa gerekse de uzun dönem yaşlanmaya karşı direncinde meydana gelebilecek değişimlerin incelenmesi esas alınarak detaylı makro ve mikro boyutta araştırmaların yapılmasını gereği ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, AMY'nin birer ılık karışım asfalt katkısı olarak kullanılabilirliği yönünde bir düşünce ortaya çıkarılabilir. Bu konuda da yapılacak çalışmalar ile AMY modifikasyonunun etki alanı genişletilebilecektir.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

Akdoğan, A. ve Güleç, S. (2007). Sürdürülebilir Kati Atık Yönetimi ve Belediyelerde Yöneticilerin Kati Atık Yönetimiyle İlgili Tutum ve Düşüncelerinin Analizine Yönelik Bir Araştırma. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 39-69. Erişim Adresi : <https://dergipark.org.tr/tr/pub/huniibf/issue/7874/103457>

Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M., Antle, C. E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Erişim Adresi: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-369.pdf>

Asli, H., Ahmadiania, E., Zargar, M., & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil-Rejuvenated bitumen binder.

*Construction and Building Materials*, 37, 398-405. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042>

Ayçiçek, S. (2011). Esnek üstyapılarda imalat ve uygulama kusurları, (Doktora Tezi), Bahçeşehir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Bayraktutan, Y. ve Sefer, U. (2011). Ekolojik iktisat ve kalkınmanın sürdürülebilirliği. Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi. 3(4). 17-36. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kilisiibfakademik/issue/19252/204515>

Bolat, D., Can-Güven, E., Gedik, K. ve Kurt-Karakuş, P. (2016). Yağ sektörü ürün veya atıklarının alternatif yakıt olarak kullanılmasının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 25-44. doi: <https://doi.org/10.17482/uujfe.00346>

Borhan, M.N., Suja, F., Ismail, A., & Rahmat, R.A.O.K. (2009), The effects of used cylinder oil on asphalt mixes. *European Journal of Scientific Research*. 28(3), 398-411. Erişim Adresi: <https://ukm.pure.elsevier.com/en/publications/the-effects-of-used-cylinder-oil-on-asphalt-mixes>

CSB. (2019). Atık madeni yağların toplanması ve ara depolanması. Erişim Adresi: <https://cygm.csb.gov.tr/atik-madeni-yaglarin-toplanmasi-ve-ara-depolanmasi-duyuru-1287>

Dedene, C., Mills-Beale, J., & You, Z. (2011). Properties of recovered asphalt binder blended with waste engine oil: A preliminary study. 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), Sunulmuş Bildiri, Çin. doi: [https://doi.org/10.1061/41186\(421\)433](https://doi.org/10.1061/41186(421)433)

Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., & Delaporte, B. (2004). Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 5(1), 163-202. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992>

Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification: A review. *Journal of Materials Science ve Technology*, 29(7), 589-594. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.04.008>

Giavarini, C. (1994). Polymer-modified bitumen. *Developments in Petroleum Science*, 40, 381-400. doi: [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(09\)70263-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(09)70263-8)

Glavič, P., & Lukman, R. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1875-1885. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>

Gökalp, İ., Özinal, Y. ve Uz, V. E. (2018). Atık bitkisel yemeklik yağların saf bitüm özelliklerine etkisinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım*

- Dergisi*, 6(4), 570-578. doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.433393>
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M. ve Kök, B.V. (2008). Farklı penetrasyona sahip asfalt çimentolarının kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve işlenebilirliklerinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 13(1), 81-91. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/uumfd/issue/21680/233348>
- Hesp, S. A., & Shurvell, H. F. (2010). X-ray fluorescence detection of waste engine oil residue in asphalt and its effect on cracking in service. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 541-553. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.488729>
- İpekçi, C. A., Coşkun, N. ve Karadayı, T. T. (2015). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(2), 43-50. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/309730>
- Johnson, K.-A. N., & Hesp, S. A. (2014). Effect of waste engine oil residue on quality and durability of SHRP materials reference library binders. *Transportation Research Record*, 2444(1), 102-109. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2444-12>
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- Liu, S., Peng, A., Wu, J., & Zhou, S.B. (2018). Waste engine oil influences on chemical and rheological properties of different asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 191(2018), 1210-1220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.126>
- Masson, J. (2008). Brief review of the chemistry of polyphosphoric acid (PPA) and bitumen. *Energy ve fuels*, 22(4), 2637-2640. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ef8005433>
- Mayyas, A., Qattawi, A., Omar, M., & Shan, D. (2012). Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(4), 1845-1862.
- ODD. (2019). Otomobil ve Hafif Ticari Araç Pazarı. Erişim Adresi: [http://odd.org.tr/web\\_2837\\_1/index.aspx](http://odd.org.tr/web_2837_1/index.aspx)
- Oner, J., Sengoz, B., Rija, S. F., & Topal, A. (2017). Investigation of the rheological properties of elastomeric polymer-modified bitumen using warm-mix asphalt additives. *Road Materials and Pavement Design*, 18(5), 1049-1066. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1206484>
- PETDER. (2017). Atık motor yağlarının yönetimi projesi faaliyet raporu 2017, Erişim Adresi: [www.petder.org.tr](http://www.petder.org.tr)
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in colloid and interface science*, 224, 72-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*. 49, 863-881. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
- Reuter, M. (2011). Limits of design for recycling and "sustainability": A review. *Waste and Biomass Valorization*, 2(2), 183-208. doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9061-3>
- Rubab, S., Burke, K., Wright, L., Hesp, S. A., Marks, P., & Raymond, C. (2011). Effects of engine oil residues on asphalt cement quality. *CTAA Annual Conference Sunulmuş Bildiri*, Kanada. Erişim Adresi: <http://worldcat.org/isbn/9780986914102>
- Sengoz, B., Topal, A., & Isikyakar, G. (2009). Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*. 23(5), 1986-1992. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.020>
- Taherkhania, H., & Noorianb, F. (2018). Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*. 1-20. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220>
- Topal, A. (2010). Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens. *Fuel Processing Technology*, 91(1), 45-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.08.007>
- Topal, A., Yılmaz, M., Kok, B. V., Kuloğlu, N., & Sengoz, B. (2011). Evaluation of rheological and image properties of styrene-butadiene-styrene and ethylene-vinyl acetate polymer modified bitumens. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(5), 3122-3132. doi: <https://doi.org/10.1002/app.34282>