

Atık LDPE'nin asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi

Effect of waste LDPE on the physical and workability properties of asphalt

Tacettin GEÇKİL^{1,a}, Ceren Beyza İNCE^{*2,b}

¹İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

• Geliş tarihi / Received: 01.05.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 07.07.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 16.07.2021

Öz

Bu çalışmada, bir atık plastik çeşidi olan LDPE'nin asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için, asfalt ile LDPE arasında bir etkileşim sağlamak amacıyla B 70/100 saf asfaltına asfalt ağırlığının % 2.5'i kadar Trietanolamin (TEOA) kimyasalı eklenmiştir. Elde edilen, asfalt-TEOA harmanına asfalt ağırlığının % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE eklenerek modifiye asfaltlar elde edilmiştir. Saf ve modifiye asfaltların ilk olarak fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve dönel ince film etüvü (RTFO) gibi geleneksel testlerle belirlenmiştir. Ayrıca, asfalt bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak kabul edilen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmıştır. Daha sonra, bağlayıcıların işlenebilirlik özellikleri dönel viskozimetre (RV) deneyi ile, kimyasal karakterizasyonu ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X- ışını kırınımı (XRD) analizleri ile belirlenmiştir. Geleneksel test sonuçlarına göre; LDPE katkı oranının artışıyla modifiye bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve sıcaklık hassasiyetlerinin azaldığı görülmüştür. RV deney sonuçlarına göre, LDPE katkı artışıyla bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının artış gösterdiği görülmüştür. SEM ve XRD analiz sonuçlarına göre, asfalt ile atık LDPE arasında kimyasal bir etkileşimin sağlandığı ve elde edilen asfalt-TEOA-LDPE karışımının homojen ve tek fazlı bir yapıda olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Asfalt, Atık LDPE, Dönel viskozimetre, Karakterizasyon, Modifiye asfalt, SEM

Abstract

In this study, the effect of LDPE, a type of waste plastic, on the physical and workability properties of asphalt was investigated. For this, Triethanolamine (TEOA) chemical up to 2.5% by weight of asphalt was added to B 70/100 pure asphalt to provide an interaction between asphalt and LDPE. Modified asphalts were obtained by adding LDPE in the ratios of 1, 2, 3, 4 and 5% of the asphalt weight to the obtained asphalt-TEOA blend. The physical properties of pure and modified asphalts were first determined by conventional tests such as penetration, softening point, ductility and rolling thin film oven (RTFO). In addition, penetration index (PI) values, which are considered as a measure of the sensitivity of asphalt binders to temperature, were also calculated. Then, the workability properties of the binders were determined by rotational viscometer (RV) test, and their chemical characterization was determined by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis. According to traditional test result; It was observed that the hardness of the modified binders increased and their temperature sensitivity decreased with the increase of the LDPE additive ratio. According to the results of the RV test, it was observed that the mixing and compression temperatures of the binders increased with the increase of LDPE additive. According to the results of SEM and XRD analysis, it was observed that a chemical interaction between asphalt and waste LDPE was provided and the resulting asphalt-TEOA-LDPE mixture was homogeneous and single-phase.

Keywords: Asphalt, Waste LDPE, Rotational viscometer, Characterization, Modified asphalt, SEM

^{*b} Ceren Beyza İNCE; c.beyzaince@gmail.com, Tel: (0507) 831 55 91, orcid.org/0000-0002-6385-0964

^a orcid.org/0000-0001-8070-6836

1. Giriş

Dünya üzerinde artan nüfusla birlikte plastiklerin üretim ve tüketim hızının da giderek artış göstermesi atık malzemelerin birikmesine neden olmakta ve dolayısıyla büyük çevre kirliliği sorunlarıyla birlikte ekolojik dengenin bozulmasına sebep olmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde çevre bilincinin yetersiz olması ve çevre koruma yasalarının da yetersiz oluşu sebebiyle bu bölgelerde yeryüzü hızla kirlenmekte ve büyük çevre sorunları meydana gelmektedir (Duranay ve Yılgin, 2016).

Doğaya serbest bırakılan plastikler fiziksel veya mekanik olarak kendi başına ayrışamaz ve parçalanamazlar. Atık plastiklerin doğada kalmasıyla zamanla plastik yığınları oluşur ve bu yığınlar da birçok haşerenin üremesine sebep olarak çeşitli hastalıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, bu atıklar yakılarak yok edilmeye çalışıldıklarında atmosfere vermiş oldukları zararlı gazlarla ekolojik dengenin tamamen bozulmasına sebep olmaktadır (Jung vd., 2018; Njeru vd., 2006). Tüm bu olumsuz durumlar, atık yönetimi konusunun önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Atık yönetimi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde çevre ve canlı sağlığının korunması açısından en etkili yöntemin geri dönüşüm olduğu, araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Behl vd., 2014; Jung vd., 2018; Njeru vd., 2006).

Günümüzde en sık kullanılan plastik çeşitleri düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polietilen tereftalat (PET), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve polistiren (PS)'dir (Geçkil vd., 2020). Bu plastiklerin yaklaşık %40'ını ise alışveriş sektöründe kullanılan taşıma poşetleri olarak bilinen kısa kullanım ömrüne sahip LDPE esaslı plastikler oluşturmaktadır (Almeida vd., 2020).

Bu çalışmada, atık plastik çeşitlerinden biri olan LDPE'nin karayolu mühendisliğinde bir katkı malzemesi olarak kullanımı araştırılmıştır.

Yol mühendisliğinde bir kaplama çeşidi olan sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamalar, belirli bir gradasyona sahip agreganın belirli orandaki asfalt ile uygun karıştırma koşullarında asfalt plentinde karıştırılmasıyla elde edilmektedir. HMA'da az miktarda bulunan asfalt bağlayıcılar, agrega daneleri ile birleştiğinde onları birbirine bağlayarak, düzgün bir kaplama yüzeyi oluşturarak ve iyi bir sürüş konforu sağlarlar (Geçkil ve Seloğlu, 2018).

Asfalt viskoelastik ve termoplastik bir malzeme olması sebebiyle sıcaklık, çevre ve çeşitli trafik yükleri altında HMA kaplamanın farklı davranışlar sergilemesine sebep olmaktadır. Bu durum, HMA kaplamada kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozulmalara neden olmaktadır (Airey, 2002; Geçkil ve Seloğlu, 2018). Bu bozulmaları en aza indirmek veya ortadan kaldırmak ve kaplamanın performansını geliştirmek amacıyla günümüzde çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak asfaltlar modifiye edilmektedir (Tunç, 2007). Modifikasyon için başta polimer kökenli malzemeler olmak üzere çeşitli yağlar, filler malzemeler, kauçuk, elyaflar ve çeşitli çözücüler gibi katkı malzemeleri kullanılmaktadır (Geçkil vd., 2020; Tunç, 2007). Ancak bu katkı malzemelerinden birçoğunun ekonomik olmaması sebebiyle, araştırmacılar son zamanlarda asfalt modifikasyonunda atık malzemeleri kullanmaya başlamışlardır (Ahmedzade vd., 2014).

Bir atık plastik çeşidi ve polimer kökenli bir malzeme olan LDPE'nin asfalt modifikasyonunda kullanıldığı çalışmalarda, LDPE katkısıyla modifiye bağlayıcıların yumuşama noktasının ve viskozitesinin arttığı, penetrasyon ve duktilite değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. Ayrıca LDPE'nin asfaltın reolojik özelliklerinin iyileştirdiği de birçok çalışmada ifade edilmiştir (Al-Hadidy ve Tan, 2009; Nejres vd., 2020; Punith vd., 2007). LDPE'nin sıcak karışımlarda kullanıldığı çalışmalarda ise, karışımların Marshall stabilite, esneklik modülü ve nem duyarlılığına karşı iyileşmeler meydana geldiği görülmüştür (Al-Hadidy ve Tan, 2009; Awwab ve Shbeeb, 2007; Nkanga vd., 2017).

Ancak, LDPE kullanılarak yapılan çalışmalarda LDPE'nin asfalt içerisinde sadece fiziksel olarak dağılım gösterdiği ve asfalt ile herhangi bir kimyasal etkileşim kurmadığı görülmüştür. Bu sebeple LDPE katkısı asfalt modifikasyonunda genellikle farklı polimerle birlikte kullanılmıştır. Çünkü LDPE'nin özgül ağırlığının asfaltın özgül ağırlığından düşük olması sebebiyle karıştırma sonrasında LDPE yüzeyde kalarak karışımın farklı davranmasına sebep olmaktadır. Bu durum, LDPE katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki depolama stabilitesi üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar asfalt ile kimyasal reaksiyon oluşturabilen polimerler üretimine (reaktif terpolimerler gibi) veya polimer ile asfalt arasında kimyasal reaksiyon oluşturabilen çeşitli katkılar kullanmaya başlamışlardır (Ahmedzade vd., 2014; Jasso vd., 2015; Polacco vd., 2015).

Bu çalışmada ise, atık LDPE katkısının asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, asfalt ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak ve homojen tek fazlı yapıda bir karışım elde etmek amacıyla TEOA kimyasalı kullanılmıştır. Çalışmada, atık LDPE modifiyeli asfaltların fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve RTFO gibi geleneksel testlerle, işlenebilirliği RV deneyiyle, karakterizasyonu ise SEM ve XRD analizleriyle belirlenmiştir.

2. Materyal ve metod

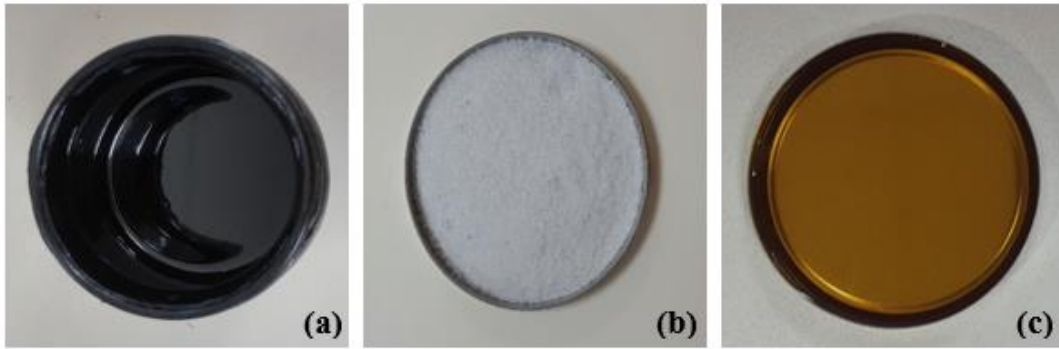
2.1. Materyal

Çalışmada, modifikasyon için penetrasyon sınıfı B 70/ 100 saf asfalt, atık LDPE ve asfalt ile LDPE

arasında kimyasal reaksiyon sağlamak için TEOA kullanılmıştır. TEOA, amin grubu bir kimyasal olması sebebiyle bir yapıya kolaylıkla bağlanabilen organik bir baz türüdür. TEOA kullanımı ile asfalt ve LDPE arasında kimyasal bir bağ kurularak faz ayrışması sorunu ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Kullanılan malzemeler Şekil 1’de, saf asfaltın geleneksel özellikleri ise Tablo 1’de verilmiştir.

Katkı olarak kullanılan atık LDPE, Bursa-SÖZAL Kimya LTD.ŞTİ.’den tedarik edilmiştir. LDPE’nin kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Asfalt ile LDPE arasında kimyasal bir etkileşim sağlamak amacıyla kullanılan TEOA’nın özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 1. Saf asfalt (a); atık LDPE (b); TEOA (c)

Tablo 1. Saf asfaltın özellikleri

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1 mm)	ASTM D5	70-100	88
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	43-51	46.75
Düktilite (cm)	ASTM D113	min. 100	>100
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	min. 230	238
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D70	1.0-1.1	1.038

Tablo 2. LDPE’nin özellikleri (Beşergil, 2008; Sen vd., 2015)

Özellik	LDPE
Yoğunluk (gr/cm ³)	0.910-0.925
Sertlik (D)	41-46
Erime noktası (°C)	105-115 °C
Çekme dayanımı (MPa)	7-40
Elastik modül (GPa)	0.07-0.3
Uzama (%)	90-800

Tablo 3. TEOA'nın özellikleri (Geçkil vd., 2020)

Özellik	TEOA
Kimyasal formül	C ₆ H ₁₅ NO ₃
Molar kütle	149.19 gr/mol
Kaynama noktası (°C)	335.4 (°C)
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.12 gr/cm ³
Yapı	Bazik

2.2. Metot

Çalışmada, LDPE katkılı bağlayıcılar elde etmek amacıyla, ilk olarak 160 °C sıcaklığa kadar ısıtılan saf asfalta ağırlıkça %2.5'i kadar TEOA ilave edilerek karıştırma işlemi 500 devirde 10 dakika boyunca Şekil 2'deki karıştırma cihazıyla yapılmıştır. TEOA oranı, karıştırma süresi ve devir sayısı laboratuvarında gerçekleştirilen ön çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Daha sonra, asfalt ağırlığının %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında LDPE ilave edilerek, 1000 devirde 50 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Tüm modifiye asfaltların hazırlanmasında aynı prosedür takip edilmiştir.

Saf ve LDPE katkılı asfaltlar çalışmada sırasıyla B, B+%1L, B+%2L, B+%3L, B+%4L ve B+%5L olarak kodlanmıştır.



Şekil 2. Karıştırma cihazı

3. Deneysel yöntem

Saf ve LDPE katkılı asfalt bağlayıcıların ilk olarak fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve dönel ince film etüvü (RTFO) gibi geleneksel testlerle tespit edilmiştir. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak bilinen Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri de hesaplanmıştır. Daha sonra bağlayıcıların işlenebilirlik özellikleri dönel viskozimetre (RV) deneyi ile, kimyasal karakterizasyonu ise taramalı elektron mikroskobu

(SEM) ve X- ışını kırınımı (XRD) analizleri ile belirlenmiştir.

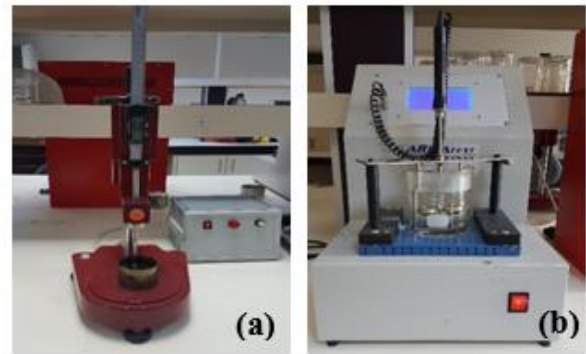
3.1. Saf ve LDPE katkılı asfaltların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

3.1.1. Penetrasyon deneyi

ASTM D5 standardına göre asfalt bağlayıcıların sertliğini veya kıvamını belirlemek amacıyla penetrasyon deneyi gerçekleştirilmektedir. Deney, 100 gr ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta 5 saniye süreyle asfalt içerisinde ilerlediği düzey mesafe olarak tanımlanmaktadır. Birimi 10⁻¹ mm olan deneyde kullanılan penetrasyon cihazı Şekil 3a'da verilmiştir.

3.1.2. Yumuşama noktası deneyi

ASTM D36 standardına göre gerçekleştirilen yumuşama noktası deneyinde asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıklara karşı direncini ölçmeyi amaçlar. Deney, üzerine standart bir bilye yerleştirilmiş olan asfalt bağlayıcının belirli bir hızda ısıtılması sonucunda gevşemiş bağlayıcının tabana temas ettiği andaki sıcaklık ölçülerek gerçekleştirilir. Yumuşama noktası cihazı Şekil 3b'de verilmiştir.



Şekil 3. Penetrasyon (a) ve yumuşama noktası (b) cihazı

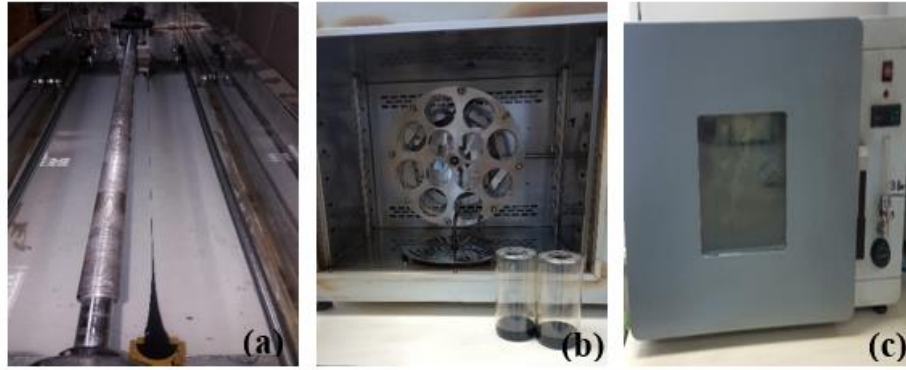
3.1.3. Düktilite deneyi

ASTM D113 standardına göre gerçekleştirilen düktilite deneyinde asfalt bağlayıcıların uzama kabiliyeti ve kohezyon mukavemetini belirlenir. Deney, standart kalıp içerisinde hazırlanmış asfaltın, 25°C sıcaklıkta ve 5cm/dakika hızla her iki ucundan çekilerek kopuncaya kadar uzadığı mesafenin cm cinsinden ifadesidir. Düktilite cihazı Şekil 4a’da verilmiştir.

3.1.4. RTFO deneyi

Asfalt bağlayıcıların zaman içerisinde sıcaklık, basınç ve diğer çevre etkileri ile bünyelerinde meydana gelen kayıp “yaşlanma” olarak ifade edilmektedir. Bağlayıcıların servis öncesi süreçte (karıştırma-sıkıştırma, taşıma ve depolama gibi)

sıcaklık ve hava etkileriyle yaşlanması “kısa süreli yaşlanma” olarak isimlendirilmektedir. Laboratuvar ortamında asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlanması dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile simüle edilmektedir. RTFOT, ASTM D2872 standardına göre gerçekleştirilir ve deneyde asfalt bağlayıcıdan 35gr’lık numuneler alınarak bu numuneler özel şişeler içerisine doldurulur (Şekil 4b). Daha sonra, bu şişeler 163 °C sıcaklıkta dakikada 15 devir yapacak şekilde ayarlanmış olan RTFOT cihazına (Şekil 4c) yerleştirilir ve 80 dakika boyunca şişelere 4000±200 mL/dak olacak şekilde hava verilerek numuneler yaşlandırılır. Deney bitiminde asfalt bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelmiş olan kütle kaybı, ilk kütle ile son kütle arasındaki farkın ilk kütleyle bölünmesi ile belirlenmektedir (Geçkil ve Seloğlu, 2018).



Şekil 4. Düktilite cihazı (a), RTFOT şişeleri (b) ve RTFOT cihazı (c)

Fiziksel özellikleri tespit edilen asfalt bağlayıcıların, sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak kabul edilen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

Denklem 1’de yer alan Pen_{25} , bağlayıcıların 25 °C’deki penetrasyon değerini, SP ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. PI değerinin artması, asfalt bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını ve sertliğinin arttığını göstermektedir. Sıcak karışım hazırlanırken yüksek PI değerine sahip bir asfalt kullanıldığında, karışımların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiği değerlendirilmektedir (Geçkil ve Seloğlu, 2018).

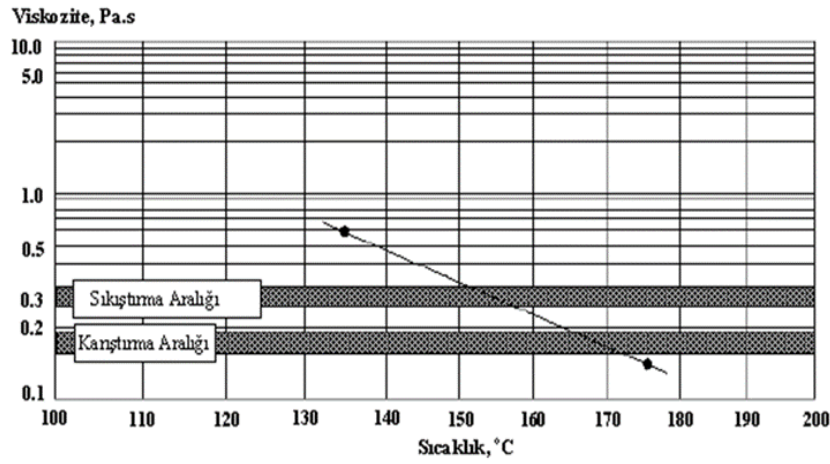
3.2. Saf ve LDPE katkılı asfaltların işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi

Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirlik özelliklerinin tayin edilmesinde RV

deneyi uygulanmaktadır. Deney, ASTM D 4402 standardına göre gerçekleştirilmektedir. Bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri kullanılarak pompalanma, karıştırma ve sıkıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespit etmek amacıyla belirlenmektedir. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için Amerikan Asfalt Enstitüsü tarafından, bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C’deki viskozite değerlerinin tespit edilmesi önerilmektedir. Bununla birlikte, bağlayıcıların 135°C’deki viskozite değerlerinin 3000 cP’yi aşmaması beklenmektedir. Deney bitiminde elde edilen viskozite değerleri yardımıyla bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği çizilmekte ve buradan HMA’nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları da belirlenebilmektedir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespit edilmesi için sırasıyla 170±20 ve 280±30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklık aralıklarının kullanılması önerilmektedir (Geçkil, 2008). Deneyde kullanılan RV cihazı Şekil 5’te, asfalt bağlayıcıların tipik viskozite-sıcaklık eğrisi ise Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. RV cihazı



Şekil 6. Asfalt Bağlayıcı İçin Tipik Viskozite Eğrisi (Geçkil, 2008)

3.3. Saf ve LDPE katkılı asfaltların kimyasal karakterizasyonu

Asfalt bağlayıcıların kimyasal karakterizasyonunda birçok analiz kullanılsa da SEM ve XRD bunlardan en sık kullanılanlarıdır. Asfalt+katkı malzemesinin uyumu ve faz yapıları SEM görüntüleri yardımıyla belirlenmektedir

(Mazumder vd., 2018). Asfalt bağlayıcının yapısındaki kristal, amorf vb. bölgeleri tanımlamak ve asfaltın yapısal özelliklerini analiz etmek için XRD analizi kullanılmaktadır (Alhumaidan vd., 2015). Çalışmada saf ve LDPE katkılı asfalt bağlayıcıların SEM görüntülerini ve XRD desenlerini elde etmede kullanılan cihazlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. SEM (a) ve XRD (b) cihazı

4. Deneysel bulgular

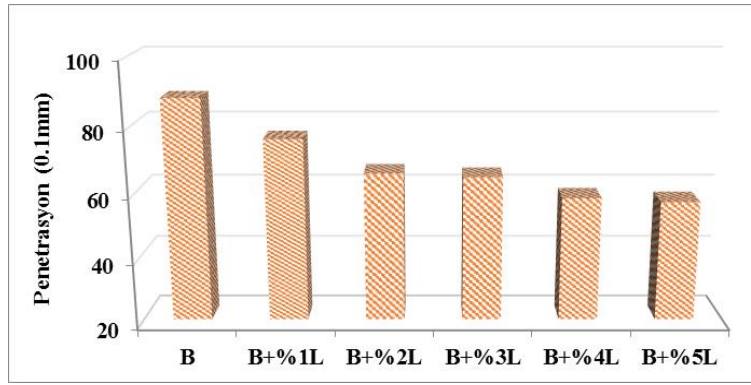
4.1. Fiziksel test sonuçları

Saf ve LDPE katkıli asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası,

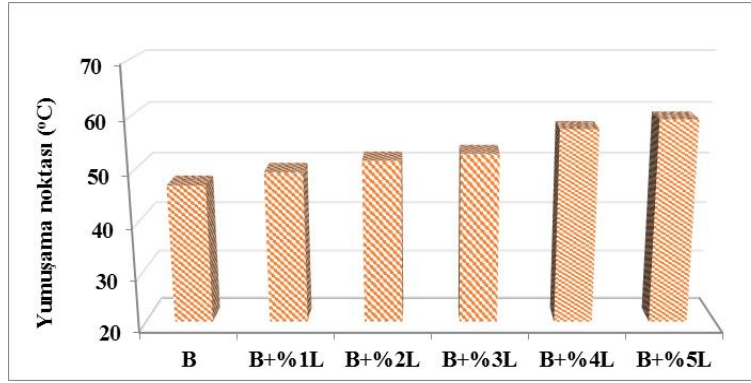
düktilite ve RTFO deneyi ile belirlenmiştir. Ayrıca tüm bağlayıcıların PI değerleri de hesaplanarak elde edilen tüm sonuçlar Tablo 4’de, bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin LDPE içeriklerine göre değişimi ise sırasıyla Şekil 8-10’da verilmiştir.

Tablo 4. Fiziksel test sonuçları

Özellik	Bağlayıcı türü					
	B	B +%1L	B +%2L	B +%3L	B +%4L	B +%5L
Penetrasyon (0.1mm)	88	75.9	65.6	64.5	58.1	56.9
Yumuşama noktası (°C)	46.8	49.3	51.5	52.8	57.4	59.2
Düktilite (cm)	117	112	108	106	101	99
PI	-0.63	-0.34	-0.17	0.11	0.88	1.20
<i>RTFOT sonrası</i>						
Kütle kaybı (%)	0.23	0.54	0.56	0.57	0.58	0.53



Şekil 8. Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri



Şekil 9. Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri

Şekil 8’de görüldüğü gibi, saf asfalta (B) LDPE katkısıyla modifiye bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde saf asfalta kıyasla değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %13.8; %25.5; %26.7; %33.9 ve %35.3 azalma şeklindedir. LDPE ilavesiyle oluşan bu sertleşmenin doğal bir sonucunda modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde de değişimler meydana gelmiştir (Şekil 9). Bu değişimler saf asfalta kıyasla sırasıyla %5.3; %10; %12.8; %22.6 ve %26.5 artış şeklindedir.

Şekil 10 incelendiğinde, LDPE artışıyla bağlayıcıların düktilite değerlerinde değişimler meydana geldiği görülmektedir. Bu değişimler saf asfalta kıyasla sırasıyla %4.3; %7.7; %9.4; %13.7 ve %15.4 azalma şeklindedir.

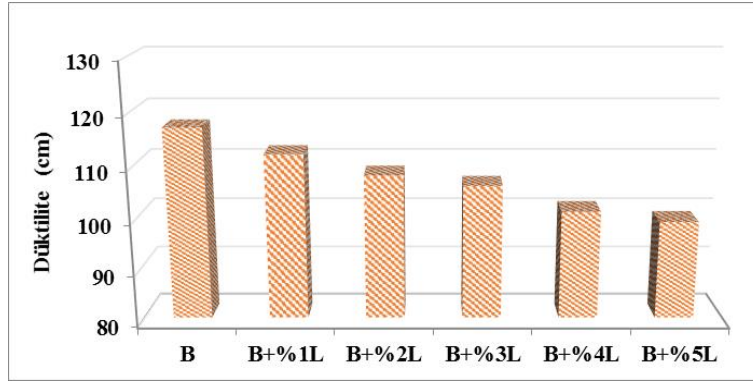
Elde edilen bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçlarına göre, modifiye bağlayıcıların kıvamında önemli sertleşme meydana geldiği ve asfalt sınıfının B 50/70 olarak değiştiği

görülmektedir. Bu durumda, modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklığın hüküm sürdüğü bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı kullanılabileceği ifade edilebilir. Düktilite değerlerinde meydana gelen azalmalar modifiye bağlayıcıların uzama yeteneğinde kısmi bir azalma olduğunu ve buna bağlı olarak kohezyon yeteneğinin düştüğünü göstermektedir. Ayrıca artış ve azalış oranlarının %4 LDPE oranında pik yaptığı, bu orandan sonra değişimlerin azaldığı görülmektedir.

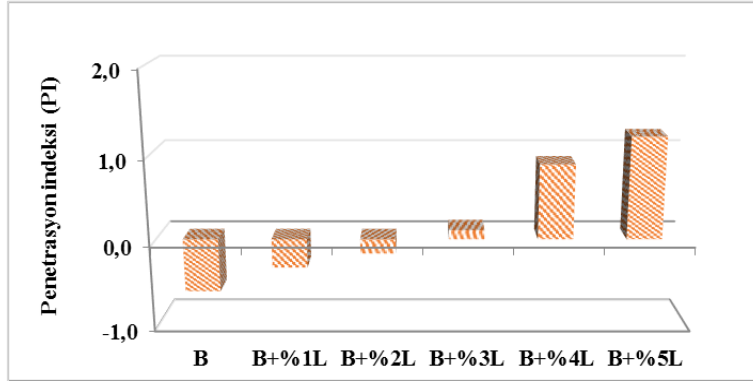
B 70/100 saf asfaltına LDPE ilavesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların PI değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 11’de verilmiştir.

Şekil 11’de, saf asfalta LDPE ilavesiyle modifiye bağlayıcıların PI değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. PI değerlerindeki artış, asfalt bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Bu durumda, LDPE katkısıyla modifiye bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin azaldığını söylemek mümkündür.

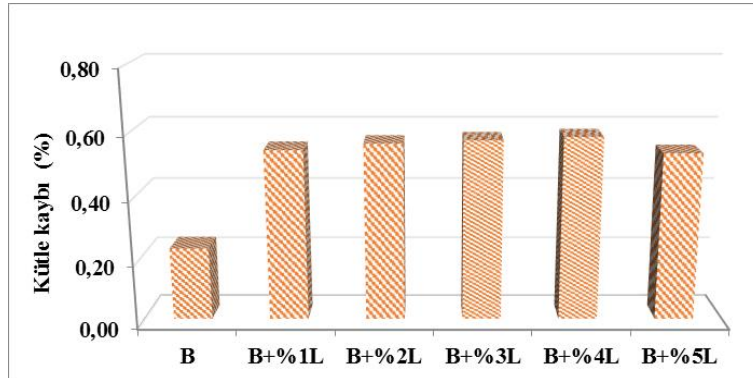
Saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelen kütle kaybı değişimleri Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 10. Bağlayıcıların düktilite değişimleri



Şekil 11. Bağlayıcıların PI değişimleri



Şekil 12. Bağlayıcıların kütle kaybı değişimleri

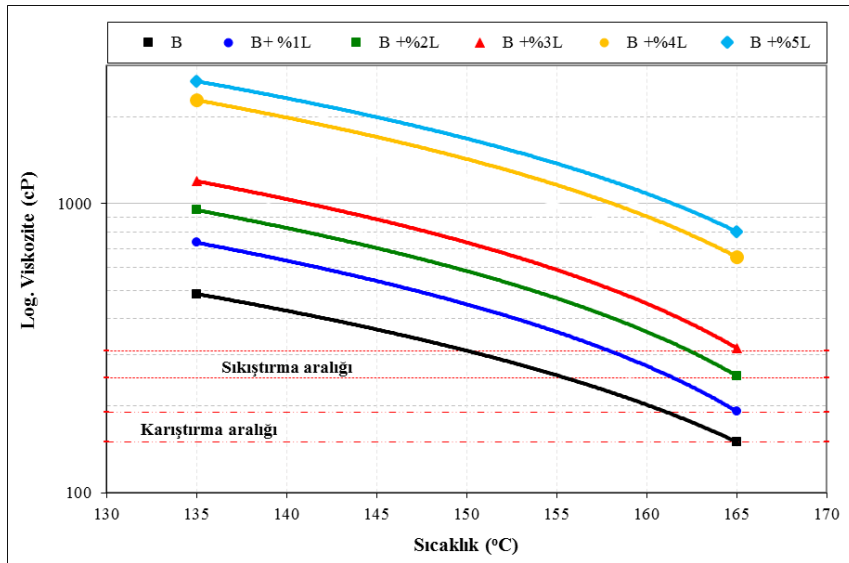
Şekil 12 incelendiğinde, LDPE katkısıyla bağlayıcıların bünyelerinde oluşan kütle kayıplarının şartnamenin öngördüğü sınırın (maks. 0.8) oldukça altında olduğu görülmektedir. Bu durum, LDPE katkısının modifiye bağlayıcıların yaşlanması veya sertleşmesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Ayrıca LDPE modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık ve oksidasyona karşı dirençli olduğunu da söylemek mümkündür.

4.2. RV test sonuçları

Saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların, 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri Brookfield DV-III cihazı kullanılarak belirlendi. Asfalt bağlayıcıların işlenebilirlik sıcaklıkları olan plentteki karıştırma ve yoldaki serme sıcaklıkları, belirlenen bu viskozite değerleri yardımıyla oluşturulan sıcaklık-viskozite grafiği yardımı ile tespit edildi. Saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların sıcaklık-viskozite grafiği Şekil 13'te, ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 14'de verilmiştir.

Şekil 13'te görüldüğü gibi, LDPE katkı ilavesiyle modifiye bağlayıcıların viskozite değerleri (135 °C ve 165 °C) önemli oranda artış göstermiştir. Bu artışlar, 135 °C'de saf asfalta kıyasla sırasıyla %50.4; %94.9; %145.3; %367.5 ve %443.6; 165 °C'de ise %27.8; %69.5; %111.3; %336.1 ve %433.3 gibi yüksek oranlarda meydana gelmiştir.

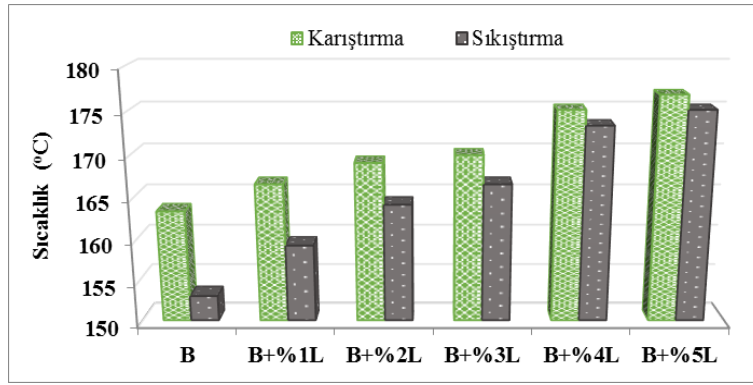
Bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim ise (Şekil 14) saf asfalta kıyasla sırasıyla karıştırma için %2.0; %3.5; %4.0; %7.2 ve %8.3; sıkıştırma için %4.1; %7.3; %8.8; %13.3 ve %14.4 artış şeklindedir. Meydana gelen bu artışlar dikkate alındığında, artış hızının %4 oranından sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Bu sonuçlarına göre, LDPE katkısı ile bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana geldiği ve yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerinin büyük oranda azaldığı, bunun sonucunda ise ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının saf asfalta kıyasla artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 13. Bağlayıcıların sıcaklık-viskozite ilişkisi

Bu durum, LDPE katkılı bağlayıcıların plentte karıştırma ve yolda serme esnasında enerji sarfiyatını arttırabileceğini ifade etmektedir. Ancak, atık LDPE katkısının çevreye ve canlılara

vermiş olduğu zararlar ve HMA kaplamada göstereceği yararlar göz önüne alındığında bu enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceği değerlendirilmektedir.



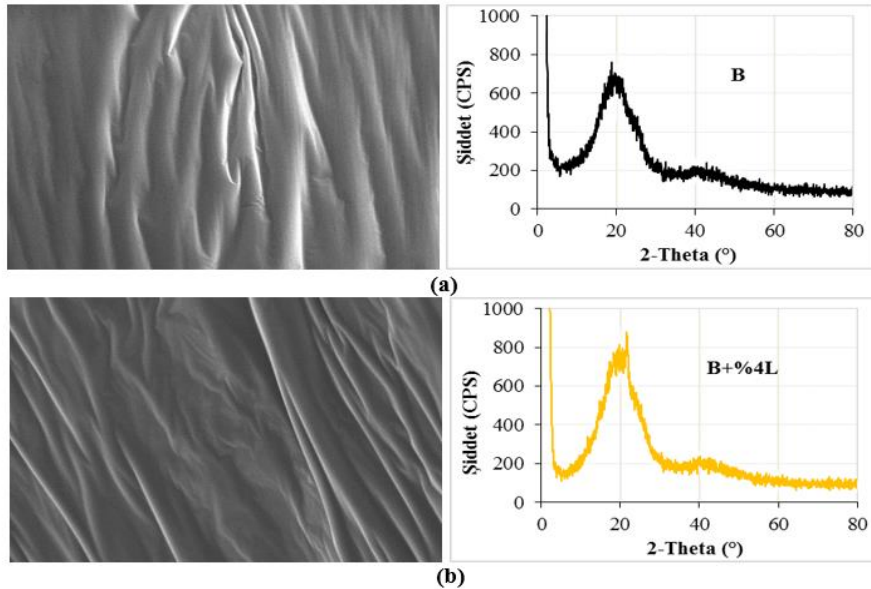
Şekil 14. Bağlayıcıların ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları

4.3. Karakterizasyon sonuçları

Çalışmada saf ve LDPE katkılı bağlayıcıların kimyasal yapısında meydana gelen değişimler SEM ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla saf asfalt (B) ile kritik oran olan B+%4L bağlayıcılarının SEM görüntüleri ve XRD desenleri Şekil 15’de verilmiştir.

Şekil 15a’da saf asfaltın (B) SEM görüntüsü incelendiğinde, yapının oldukça homojen ve tek fazlı olduğu görülmektedir. Saf asfalta %4 LDPE+TEOA ilave edildiğinde ise (Şekil 15b), saf asfaltta olduğu gibi homojen ve tek fazlı bir yapının korunduğu görülmektedir. Saf asfaltın (B) XRD deseni incelendiğinde ise, iki farklı

makromoleküler yapının mevcut olduğu görülmektedir. $2\theta \cong 20^\circ$ civarında elde edilen ilk pik geniş ve yayvan olan kristalin bölgeyi, $2\theta \cong 40^\circ$ civarında elde edilen ikinci pik ise daha az alana sahip olan amorf bölgenin varlığını göstermektedir. B+%4L bağlayıcısının XRD deseninde ise saf asfalta göre pik şiddetinin ($2\theta \cong 20^\circ$) arttığı ve kristalin bölgelerin kısmen arttığı, ancak LDPE katkısıyla $2\theta \cong 40^\circ$ civarındaki pikin giderek yayvanlaşmaya başladığı ve amorf yapının giderek arttığı görülmüştür. Bu durum, LDPE katkısının asfalt+TEOA harmanıyla birleştiğinde yapıyı amorflaştırıldığı ve kimyasal bir reaksiyona girdiği olarak yorumlanmaktadır.



Şekil 15. Bağlayıcıların SEM görüntüleri ve XRD desenleri; (a) B; (b) B+%4L

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir atık plastik çeşidi olan LDPE’nin asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Penetrasyon sonuçlarına göre, LDPE katkı oranının artışı ile modifiye bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve penetrasyon sınıfı B 50/70 asfalta dönüştüğü görülmüştür.

2. Yumuşama noktası sonuçlarına göre, elde edilen sonuçların penetrasyon sonuçları ile uyumlu olduğu ve LDPE katkısıyla bağlayıcıların sertleşmesi sonucunda yumuşama noktası değerlerinin de yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre, LDPE katkısıyla modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinin arttığı ve daha sıcak bölgelerde kullanılabilmesi görülmüştür.

3. Düktilite sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla modifiye bağlayıcıların uzama kabiliyetinin ve kohezyon mukavemetinin azaldığı görülmüştür.

4. PI sonuçları değerlendirildiğinde, LDPE ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmüştür.

5. Kütle kaybı sonuçlarına göre, LDPE katkısının modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

6. RV sonuçlarına göre, LDPE katkısıyla bağlayıcıların akıcılıklarının azaldığı ve bunun sonucunda bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının artış göstererek daha fazla enerji tüketimi gerektireceği görülmüştür. Ancak, atık LDPE'nin çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararlar göz önüne alındığında bu enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceği ifade edilebilir.

Sonuç olarak, atık LDPE'nin asfaltın kıvamını sertleştirdiği ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak, LDPE'nin karayolu mühendisliğinde bir katkı olarak kullanılmasının, bu atıkların çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararları azaltacağı ve ülke ekonomisine bir katma değer sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Biriminin **İÜ-BAP FYL 2016/99** numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T. and Grygoryeva, O. (2014). Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 69, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.027>

Airey, G.D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16(8), 473-487. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00103-4)

Al-Hadidy, A.I. and Tan, Y. (2009). Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 618-623. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(618\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(618))

AlHumaidan F.S., Hauser, A., Rana, M.S., Lababidi, H.M.S. and Behbehani M. (2015). Changes in asphaltene structure during thermal cracking of residual oils: XRD study. *Fuel*, 150, 558-564. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.076>

Almeida, A., Capitaio, S., Bandeira, R., Fonseca, M. and Picado-Santos, L. (2020). Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 232, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117253>

Awwab, M.T. and Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390-396.

Behl, A., Sharma, G. and Kumar, G. (2014). A sustainable approach: utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials* 54, 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.050>

Besergil, B. (2008). *Polimer kimyası (ikinci baskı)*. Ankara: Gazi Kitabevi.

Duranay, N. ve Yılgin, M. (2016). Atık plastiğin kömür ve biokütle ile birlikte yakılarak değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (2), 35-42.

Geçkil, T. (2008). Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Geçkil, T. and Seloğlu, M. (2018). Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and Building Materials*, 173, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>

Geçkil, T., Önal, Y. ve İnce, C.B. (2020). Atık polietilen tereftalat (PET) ile Modifiye edilmiş saf bitümün fiziksel, morfolojik ve ısıl özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*,

- 32(1), 157-166.
<https://doi.org/10.35234/fumbd.618218>
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D. and Zanzotto, L. (2015). Rheology of conventional asphalt modified with sbs, elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology*, 140, 172-179.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.002>
- Jung, M.R., Horgen, F.D. and Orski, S.V. (2018). Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 704–716.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>
- Mazumder, M., Ahmed, R., Ali, A.W. and Lee, S.J. (2018). SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 186, 313-329.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.126>
- Nejres, M., Mustafa, Y.F. and Aldewachi, H.S. (2020). Evaluation of natural asphalt properties treated with egg shell waste and low density polyethylene. *International Journal of Pavement Engineering*, 1029-8436.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1728534>
- Njeru, J. (2006). The urban political ecology of plastic bag waste problem in Nairobi, Kenya. *Geoforum*, 37, 1046–1058.
- Nkanga, U.J., Joseph, J.A., Adams, F.V. and Uche, O.U. (2017). Characterization of bitumen/plastic blends for flexible pavement application. *Procedia Manufacturing*, 7, 490-496.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.051>
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F. and 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.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
- Punith, V.S. and Veeraragavan. A. (2007). Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 500-507.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(500))
- Sen, S.K. and Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 462–473.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.