

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastikinin  
Pirrolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt  
Katkısı Olarak İncelenmesi**

\*<sup>1</sup>Hüseyin KÖSE, <sup>2</sup>Osman Nuri ÇELİK

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,  
Türkiye, hkose@ktun.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6769>

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,  
Türkiye, oncelik@ktun.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-4724>

Geliş / Recieved: 12.05.2022;

Kabul / Accepted: 29.06.2022

**Öz**

Ilık karışım asfalt (IKA), geleneksel bitümlü sıcak karışımdan (BSK) daha düşük sıcaklıklarda serilip sıkıştırılabilen yeni bir karışım türüdür. Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) türündeki atık plastiklerin pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin IKA üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çar ve vaks ürünler, sırasıyla 300-350°C ve 450-500°C sıcaklık aralıklarında, 900 gr numune kullanılarak yavaş piroliz yöntemi ile üretilmiştir. Piroliz ürünleri (bitüm ağırlığına %6 oranında) saf bitümle (B50/70) modifiye edilerek 3 farklı formda katkılı bitüm hazırlanmıştır: YYPE<sub>PÇ</sub> (YYPE piroliz çar) modifiyeli bitüm, YYPE<sub>PV</sub> (YYPE piroliz vaks) modifiyeli bitüm ve YYPE<sub>PÇV</sub> (YYPE piroliz çar ve vaks) modifiyeli bitüm. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılarak katkıların bitüm üzerindeki fiziksel değişimleri incelenmiştir. Ayrıca eşdeğer viskoz yöntemi ile modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, hem saf bitümle hazırlanan BSK'ya hem de piroliz katkıları ile hazırlanan IKA'lara Marshall stabilite-akma analizi yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcı test sonuçları gösteriyor ki, piroliz çarı saf bitümü sertleştirirken, vaks ürün yumuşatmaktadır. Dolayısıyla, çar ürünün etkisi ile bitümün penetrasyonu azalırken, yumuşama noktası

\*<sup>1</sup>Sorumlu yazar / Corresponding author

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Köse, H.& Celik, O. N. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastikinin Pirrolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 31-46.

artmaktadır. Vaks ürünün etkisiyle ise tersi sonuçlar elde edilmiştir. Saf bitüme kıyasla modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki azalma değerleri  $YYPE_{PV}$ ,  $YYPE_{PÇV}$  ve  $YYPE_{PÇ}$  modifiyeli bitümler için sırasıyla 24°C, 14,5 °C ve 3,5°C olmuştur. İKA'ların Marshall stabilite değeri, BSK'dan az bir farkla daha düşük olmasına rağmen şartname limit değerini rahatlıkla sağlamıştır.

**Anahtar kelimeler:** *Ilık Karışım Asfalt, Yavaş Piroliz, Plastik Atığı, Yüksek Yoğunluklu Polietilen Piroliz Çarı ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Piroliz Vaksı*

## Investigation of Products Obtained from Pyrolysis of High Density Polyethylene Waste Plastic as a Warm Mix Asphalt Additive

### Abstract

Warm mix asphalt (WMA) is a new technology that can be mixed and compacted at lower temperatures than hot mix asphalt (HMA). In this study, the effect of pyrolytic products (char and wax) obtain from the waste plastic (High Density Polyethylene-HDPE) on warm mix asphalt was investigated. Char and wax products were produced by slow pyrolysis method using 900 gr samples at the temperature ranges of 300-350°C and 450-500°C, respectively. These products were modified with virgin bitumen (at a rate of 6% by weight of bitumen) in the form of 3 modified bitumen: HDPE Pyrolysis Char (HDPE<sub>PC</sub>) modified bitumen, HDPE Pyrolysis Wax (HDPE<sub>PW</sub>) modified bitumen, HDPE Pyrolysis Char+Wax (HDPE<sub>PCW</sub>) modified bitumen. Penetration, softening point and viscosity tests were carried out to determine the physical properties of modified bitumen and virgin bitumen. Besides, Marshall Test Method was conducted to compare stability performance of the mixtures. The results show that, the addition of char decreased penetration value and increased softening point of virgin bitumen. The opposite results were obtained with the effect of the wax. According to the equivalent viscous method, the mixing and compaction temperature of the bituminous mixture can be reduced by 24°C, 14,5°C and 3,5°C, respectively, when HDPE<sub>PW</sub>, HDPE<sub>PCW</sub> and HDPE<sub>PC</sub> are added to the bitumen. Marshall Test results show that the stability values of the WMA samples were slightly lower than the HMA sample and were also above the specification limits.

**Keywords:** Warm Mix Asphalt, Slow Pyrolysis, Plastic Waste, High Density Polyethylene Pyrolysis Char, High Density Polyethylene Pyrolysis Wax.

\*1Sorumlu yazar / Corresponding author

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Köse, H.& Celik, O. N. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastiğinin Pirolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 31-46.

## 1. Giriş

Ilık karışım asfalt (IKA), üretim ve serim sıcaklığı bitümlü sıcak karışımdan (BSK) 20-40°C daha düşük olan bir karışım türüdür. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının düşük olması IKA'ya çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir (Rubio et al., 2012):

- Emisyonları azaltır.
- Zararlı gazların olmamasından dolayı daha iyi çalışma koşulları sağlar.
- Karışımın üretilmesi daha az enerjiyle sağlanır.
- Karışımın serilmesi işleminden çok kısa bir süre sonra yol trafiğe açılır.
- Karışım daha uzun mesafelere taşınabilir.
- Yol inşaa sezonunu uzatır.

IKA sınıflandırmasında kullanılan en yaygın yöntem, kullanılan teknolojiye göre sınıflandırma yapmaktır. Bu yöntemle IKA 3 gruba ayrılır:

- Organik katkılar: Organik katkılı teknolojilerde bitüme parafin veya benzeri maddeler katılır. Sıcaklık, katılan maddenin erime noktasının üzerine çıktığında bitümün viskozitesinde düşmeler meydana gelir. Böylece karışımın karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değeri azalır.
- Köpükleme yöntemi: Bu yöntem kendi içinde iki alt kategoriye ayrılır:
  - Su içerikli (dolaylı) teknolojiler: Su içerikli teknolojiler, sentetik zeolit kullanır. Bu ürün, alkali

metallerin alümino silikatlarının bir bileşimidir ve hidrotermal kristal yapıdadır. Kristal yapının bünyesinde, sıcaklık arttıkça buharlaşan su bulunmaktadır. Buharlaşan suyun etkisiyle bitümlü bağlayıcı köpüklenir. Bu köpüklenme işleminin etkisi ile bitümlü bağlayıcının viskozitesi azalır. Dolayısıyla karışımın üretim sıcaklığı da düşürülmüş olur.

- Su bazlı (doğrudan) teknolojiler: Bu yöntemde köpüklenme etkisi oluşturmak için ihtiyaç duyulan su, özel enjektörler yardımıyla doğrudan karışıma ilave edilir. Su hızlı bir şekilde buharlaştıkça, büyük hacimli köpük elde edilir.

- Kimyasal katkılar: Bu yöntemde bağlayıcıya çeşitli kimyasal katkıları eklenir. Karışımın üretim ve sıkıştırma sıcaklığını düşürmek için viskozite azaltmaya veya köpükleme işlemine ihtiyaç duyulmaz. Onun yerine, yüzey etkinleştirici maddeler, polimerler, emülgatörler kullanılarak karışımın işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve yapışkanlık özellikleri arttırılır.

Plastik atıklar hem insan sağlığını hem de çevreyi olumsuz etkilemesi sebebiyle dünya genelinde büyük bir problem haline gelmiştir. Plastik talebindeki artışın devam etmesi atık plastik sorununun da hızlı bir şekilde büyümesine sebep olmaktadır. Avrupa Plastik Hammadde Üreticileri Birliğinin

2020 yılında yayınlanan raporuna göre, Avrupa'da 2018 yılında 61,8 milyon ton plastik üretilmiş olup, bunun 29 milyonu geri toplanmıştır (PlasticsEurope, 2020). Yaklaşık 7 milyon ton plastik ise geri dönüşüme girmeden toprağa gömülmekte ya da serbest atık olarak doğada var olmaya devam etmektedir. Dolayısıyla hala çok önemli miktarda ömrünü tamamlamış plastik, çevreyi kirletmeye devam etmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı, plastik atıkların geri dönüşümüne yardımcı olmak adına çeşitli çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalarda, plastik atıklar hem doğrudan hem de çeşitli işlemlerden (piroliz vb.) geçirilerek bitüm veya bitümlü karışım içerisinde kullanılabilir. Aşağıda bu çalışmada kullanılacak plastik türü olan polietilenin asfaltta kullanımı ile ilgili yapılan literatür incelemesine yer verilmiştir:

- Almeida, Capitão, Estanqueiro ve Picado-Santosc (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE (Düşük yoğunluklu polietilen) türünde plastik film atığının IKA ve BSK üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, DYPE bitüm ağırlığınca %6 oranında kuru yöntemle IKA ve BSK'ya dahil edilmiştir. IKA katkısı olarak Sasobit-Redux® kullanılmıştır. Karışımlara yapılan tekerlek izi testinde, IKA numuneleri BSK'dan çok daha başarılı sonuç vermiştir. Tekerlek izindeki azalmanın BSK'ya göre %67 oranlarında olduğu belirtilmiştir.
- Costa, Silva, Peralta ve Oliveira (2019) yaptıkları bir çalışmada, atık

polimerlerden EVA (Etilen vinil asetat) ve YYPE'nin, 35/50 penetrasyon dereceli bitüm üzerindeki reolojik etkilerini incelemiştir. Ayrıca, SBS (Stiren-Butadien-Stiren) modifiyeli bitümle de karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, EVA ve SBS modifiyeli bitümün viskozite ve reolojik özellikler açısından birbirine yakın sonuçlar verdiği, ancak YYPE modifiyeli bitümün özellikle MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) sonuçlarının istenilen düzeyde olmadığı belirtilmiştir.

- Arabani ve Pedram (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, YYPE atık plastiğinin ve atık camın BSK'nın performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada, atık cam maksimum 4,75 mm boyutta doğrudan karışıma dahil edilirken, YYPE 0,075-0,15 mm boyutlarında bitüme ilave edilmiştir. Karışımlara yapılan testlerden biri olan dolaylı çekme testinde, YYPE miktarı arttıkça karışımın yorulmaya karşı direncinin arttığı, optimum dozajın ise %6-10 arasında olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar dinamik sünme testinde de elde edilmiştir.
- Attaelmanan, Feng ve AI (2011) yaptıkları bir çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) plastiğinin bitümlü sıcak karışımın performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, YYPE ilavesi ile karışımın

Marshall stabilitesi yükselmiştir. Marshall oranındaki en büyük artış (%55), %5 YYPE ilavesi sonucu gerçekleşmiştir. YYPE içerikli karışımların dolaylı çekme gerilmesi oranı %85'ten daha fazla çıkmıştır. Bu sonuç, bu tip modifiye karışımların nem hassasiyetine karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir.

- Shang, Wang ve Zhang (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş çapraz bağlı polietilen (PEX) maddesinin pirolizinden elde edilen katı ürünün ılık karışım asfalt performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen katı piroliz ürününün hem saf bitüm hem de SBS modifiyeli bitüm üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan DSR (Dynamic Shear Rheometer) test sonuçlarına göre, PEX katkı maddesi hem saf bitümün hem de SBS modifiyeli bitümün kompleks modül değerini arttırmış, faz açısını ise azaltmıştır.
- Al-Hadidy ve Tan (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE atık plastiğin pirolizinden elde edilen katı ürünün taş mastik asfalt (TMA) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçları gösteriyor ki, LDPE ilavesi bitümün penetrasyon değerini düşürürken, yumuşama noktası değerini arttırmıştır. %6 DYPE oranına kadar duktilite

sonuçları şartname limitlerini sağlamıştır. Yine %6 oranında DYPE kullanımı ile Marshall stabilitesi (en yüksek değerine ulaşarak) BSK'ya kıyasla %58 daha yüksek sonuç vermiştir.

- Hınıslioğlu ve Ağar (2004), YYPE içeren plastik atıkların, BSK'da polimer katkısı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, YYPE içeren modifiye bitümler farklı oranlarda (%4-6-8), farklı karıştırma sıcaklıklarında (145-155-165°C) ve farklı sürelerde (5-15-30 dk) hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara ve saf bitümle hazırlanan kontrol karışımına Marshall testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, optimum modifikasyon parametreleri %4 YYPE, 165°C karıştırma sıcaklığı ve 30 dk karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.

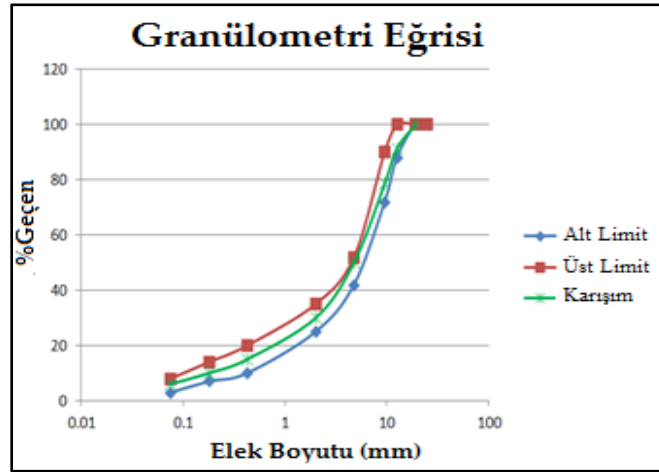
Literatür incelendiğinde, YYPE atık plastiğinin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların önemli bir kısmının BSK performansını geliştirmek üzere yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak YYPE atık plastiğinin yavaş pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin İKA performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada, atık plastik olarak Petilen YY S türünde yüksek yoğunluklu polietilen yağ bidonları kullanılmıştır. Plastikler, Konya'da çeşitli sanayi bölgelerinden küçük parçalara ayrılmış vaziyette toplanmıştır. Kontrol numunesi olarak kullanılan B50/70

sınıfına ait saf bitüm, Kırıkkale Rafinerisi'nden temin edilmiştir. Bitümlü karışımlarda kullanılan agrega kalker olup, Karaömerler taş ocağından alınmıştır. Agrega gradasyonu, Karayolları Teknik Şartnamesi Aşınma Tabakası Tip 1 Gradasyonu'na (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013) uygun olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Hazırlanan agrega karışımına ait granülometri eğrisi

### 2.2 Yöntem

Çalışmada, YYPE atık plastikler piroliz yöntemi ile çar ve vaks ürünlere dönüştürülmüştür (Şekil 2). Çar ve vaks ürünlere ait bazı fiziksel özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir. Elde edilen piroliz ürünleri saf bitümle ıslak yöntem ile

karıştırılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Dolayısıyla, İKA yöntemi olarak organik katkı ilaveli yöntem kullanılmıştır. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılmıştır. BSK ve İKA'lara ise Marshall stabilite-akma analizi uygulanmıştır.

Tablo 1. YYPE piroliz çar ve vaks ürünlerin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	YYPE Piroliz Çarı	YYPE Piroliz Vaksı
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,92-1,11	0,89-0,91
Fiziksel Görünüm	Katı	Vaks
Renk	Siyah	Açık Sarı
Suda Çözünürlük	Çözünmez	Çözünmez



Şekil 2. YYPE piroliz çar (solda) ve vaks ürünü (sağda)

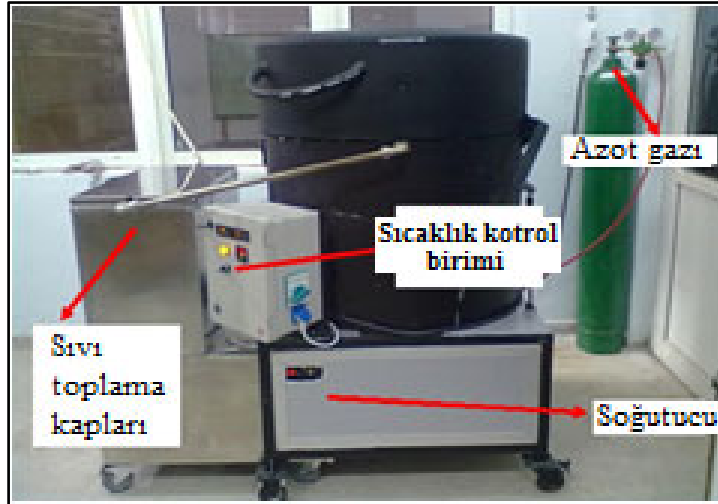
### 2.2.1 Piroliz sistemi

Piroliz, malzemelerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta termal olarak ayrıştırılması işlemidir. YYPE pirolizi, Şekil 3'te görülen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde ortamı oksijensiz hale getirmek için azot gazı kullanılmıştır. Sistem, 3-5°C/dk ısıtma hızı ile ısıtılarak istenilen sıcaklığa getirilmiştir. Piroliz ürünlerinin verimini maksimize etmek amacıyla deney iki farklı sıcaklık aralığında yapılmıştır:

- İlk grupta, çar ürün verimini maksimumda tutmak amacıyla

piroliz sıcaklığı 300-350°C bandında tutulmuştur. Bu sıcaklık yapılan ön testler sonucunda belirlenmiş olup, benzer sıcaklık aralığı Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq ve Gul (2014) tarafından yapılan çalışmada da kullanılmıştır.

- İkinci grupta ise, vaks ürün verimini maksimize etmek için sıcaklık aralığı 450-500°C'de tutulmuştur. Seçilen sıcaklık aralığı, Cepelliogulari & Putun (2013) ve Kumar & Singh (2011) tarafından yapılan çalışmalarda da tercih edilmiştir.



Şekil 3. Piroliz deney düzeneği



## 2.2.2 Modifiye bitümlerin hazırlanması

YYPE pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünleri ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere bitüm ile %6 oranında (bitüm ağırlığınca) modifiye edilmiştir. Katkı oranı literatürdeki araştırmalar dikkate alınarak seçilmiştir. Şöyle ki, literatür incelendiğinde gerek polietilen atık plastiğinin doğrudan bitüme katıldığı çalışmalarda (Almeida et al., 2021; Arabani ve Pedram, 2016; Attaelmanan et al., 2011) gerekse de plastiğin piroliz edilip elde edilen ürünün bitümle modifiye edildiği çalışmada (Al-Hadidy ve Tan, 2009) katkı maddesinin optimum dozajının %5-6 arasında değiştiği gözlenmiştir. Çalışmada kullanılacak modifiye bitümler aşağıda belirtildiği gibi oluşturulmuştur:

- YYPE<sub>PÇ</sub>: Sadece piroliz çarının kullanıldığı modifiye bitüm. Bu süreçte, bitüm 160°C'ye kadar ısıtılmış, ardından piroliz çarı bitüme katılarak 30 dk boyunca 2000 dönüş/dk hızında yüksek kesmeli mikserle karıştırılmıştır.
- YYPE<sub>V</sub>: Sadece piroliz vaksının kullanıldığı modifiye bitüm. Bu aşamada, bitüm 120°C'ye kadar ısıtılmış, ardından vaks ürün bitüme katılarak 20 dk boyunca 2000 dönüş/dk hızında karıştırılmıştır.
- YYPE<sub>PÇV</sub>: Hem çar hem de vaks ürününün kullanıldığı modifiye bitüm. Bu modifikasyon mekanizmasında, önce bitüm 160°C'ye kadar ısıtılıp çar ürün yukarıda belirtilen süre ve hızda bitüme katılmıştır. Sonrasında, bitüm 120°C'ye kadar soğutulup

vaks ürün bitüme dahil edilmiştir.

Katkıların bitümle modifikasyon sürecinde, seçilen sıcaklık, süre ve hız parametrelerinin, bu konuda benzer çalışmalar yapan Al-Hadidy (2006), Al-Hadidy ve Tan (2009), Shang et al. (2011), Appiah, Berko-Boateng ve Tagbor (2017) tarafından da kullanıldığı tespit edilmiştir. Hazırlanan modifiye bitümlerin, aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine yapılan bitümlü bağlayıcı testlerinde deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Sonuçlar ayrıntılı olarak EKLER kısmında sunulmuştur. Bu sonuçlardan, karışımın homojen olma yönünde güçlü göstergelere sahip olduğu anlaşılmıştır.

## 2.2.3 Bitümlü bağlayıcı ve karışım testleri

### 2.2.3.1 Penetrasyon testi (ASTM D5/D5M-13)

Bitümün kıvamını ölçmek için kullanılan bir testtir. Numuneye standart bir penetrasyon iğnesi 5 sn boyunca batırılır. Numuneye uygulanan yük 100 gr'dır. Standart deney sıcaklığı ise 25°C'dir. İğnenin batma derinliği milimetrenin onda biri cinsinden penetrasyon değerini verir.

### 2.2.3.2 Yumuşama noktası testi (ASTM D36/D36M-14)

Bitümün, başlangıç sıcaklığı 5°C olan içi su/gliserin dolu bir kap içerisinde belirli sıcaklık artış hızında (5°C/dk) ısıtılması sonucu, üzerinde duran 3,5 gr

ağırlığındaki bilyelerin etkisi ile yumuşayarak 25 mm altındaki tablaya temas ettiği sıcaklık yumuşama noktası olarak adlandırılır.

### 2.2.3.3 Rotasyonel viskozimetre testi (ASTM D4402/D4402M-15)

Bitümün belirli bir sıcaklıktaki viskozitesi bu deney ile belirlenir. Bu yöntemde, tabanı konik biçimli bir aparat istenilen sıcaklığa kadar ısıtılan bitüm numunesine daldırılır. Cihaz istenilen bir hızda bu aparatı numune içerisinde döndürür. Numunenin dönmeye karşı gösterdiği bu direnci, cihaz tork cinsinden kaydeder. Elde edilen tork, hız ve aparatın geometrik bilgileri kullanılarak malzemenin viskozitesi pascal saniye veya centipoise cinsinden tespit edilir.

Eşdeğer viskoz yöntemi ile sıcaklık-viskozite grafiği çizilerek karışımın, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilmektedir. Bu yöntemde,  $0,17\pm 0,02$  Pas değerlerine karşılık gelen aralık, karıştırma sıcaklık aralığı olarak kabul edilmektedir. Sıkıştırma sıcaklık aralığı için belirlenen viskozite değer aralığı ise  $0,28\pm 0,03$  Pas'dir (Asphalt Institute, 2014).

### 2.2.3.4 Marshall stabilite-akma analizi (ASTM D6927-15)

Marshall stabilite-akma analizi ile ASTM D6926-20'ye göre hazırlanan briketlerin ( $60^{\circ}\text{C}$ 'deki su banyosunda 30-40 dk bekletildikten sonra) taşıyabildiği maksimum yük tespit edilir. Bu test ile ayrıca briketlere ait akma (deformasyon) değerleri de belirlenir.

## 3. Bulgular

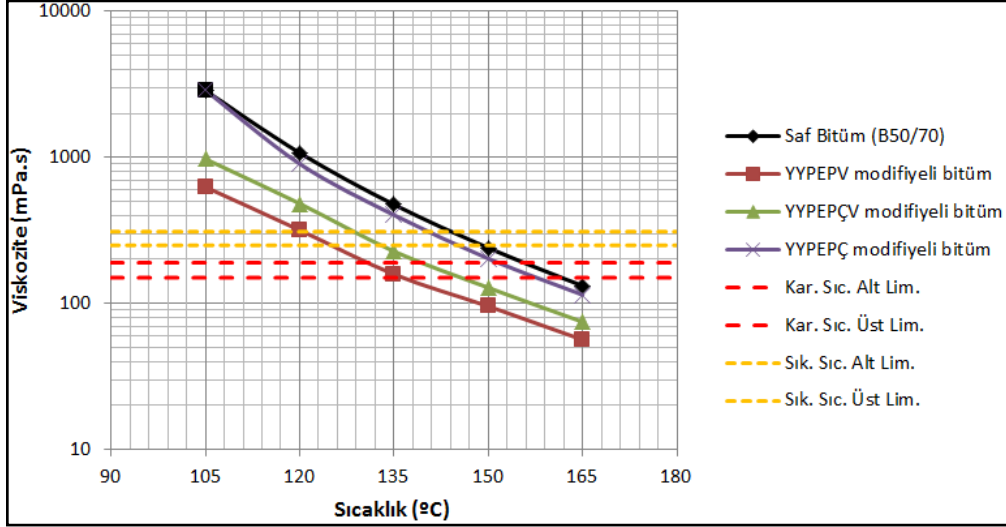
### 3.1 Bitümlü bağlayıcı test sonuçları

Saf ve katkıli bitümlere yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları Tablo 2'de, viskozite sonuçları ise Şekil 4'te sunulmuştur.

Tablo 2'den görüleceği üzere, bitüme sadece çar ilavesi yapıldığında ( $\text{YYPE}_{\text{PÇ}}$ ), bitüm sertleşmekte, buna bağlı olarak bitümün penetrasyon değeri azalırken yumuşama noktası artmaktadır. Sadece vaks etkisi ile ise bitümün penetrasyon değerinde artış olurken, yumuşama noktasında azalma görülmüştür. Hem çar hem de vaks modifiyeli bitümde ( $\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$  modifiyeli bitüm) ise saf bitüme kıyasla penetrasyon değerinde artış gözlenirken, yumuşama noktası değeri azalmıştır.  $\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$  modifiyeli bitüm sonuçlarından, vaksın yumuşatıcı etkisinin çarın sertleştirici etkisinden daha baskın olduğu anlaşılmıştır.

**Tablo 2.** Saf ve katkıli bitümlere ait penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçları

Deney	Saf Bitüm (B50/70)	$\text{YYPE}_{\text{PÇ}}$ modifiyeli bitüm	$\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$ modifiyeli bitüm	$\text{YYPE}_{\text{PV}}$ modifiyeli bitüm
Penetrasyon (0.1 mm)	58	51	144	243
Yumuşama noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	52	54	44	38



Şekil 4. Saf ve katkıli bitümlere ait viskozite test sonuçları

Şekil 4'te saf ve katkıli bitümlere ait 105-165°C aralığındaki viskozite değerleri görülmektedir. Grafikte ayrıca, kırmızı ve sarı kesikli çizgilerle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı alt ve üst limit değerleri de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, sıcaklık arttıkça bitümlerin tamamının viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. YYPE<sub>PV</sub> ve YYPE<sub>ÇV</sub> modifiyeli bitümlerin her sıcaklıkta viskozite değerinin saf bitümden daha aşağıda olduğu görülmektedir. YYPE<sub>Ç</sub> modifiyeli bitümün viskozite değerleri ise 105°C'den itibaren azalmaya başlamıştır (105°C'den itibaren ortaya çıkan bu düşüşün, piroliz çarının erimeye başladığı sıcaklık sebebi ile olduğu düşünülmektedir). Ancak grafikten de görüleceği üzere YYPE<sub>Ç</sub> ile saf bitümün viskozite sonuçları birbirine oldukça yakındır. Eşdeğer viskoz yöntemi ile bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri tespit edilmiştir (Tablo 3). Saf bitüme kıyasla

modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki azalma değerleri YYPE<sub>PV</sub>, YYPE<sub>ÇV</sub> ve YYPE<sub>Ç</sub> modifiye bitümler için sırasıyla 24°C, 14,5 °C ve 3,5 °C olmuştur. Bu sonuçlardan, YYPE<sub>PV</sub> ve YYPE<sub>ÇV</sub> modifiyeli bitümlerin, organik katkıli yöntemle hazırlanan İKA'lara benzer davranış sergilediği söylenebilir. YYPE<sub>Ç</sub> modifiyeli bitümün ise, viskozite değerleri yeterince düşük olmadığından İKA özelliğinin güçlü olmadığı görülmüştür.

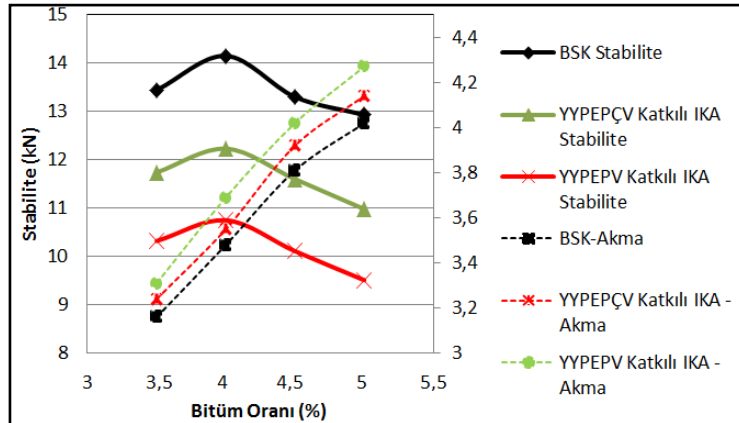
Tablo 3. Saf ve katkıli bitümlere ait karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Bitüm türü	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
Saf Bitüm	155-160	146-150
YYPE <sub>Ç</sub>	151-157	142-146
YYPE <sub>ÇV</sub>	141-145	131-136
YYPE <sub>PV</sub>	131-136	121-125

### 3.2. Marshall stabilite-akma analizi sonuçları

BSK ve IKA numunelerin stabilite-akma analizlerinin yapılması için, %3,5-4-4,5-5 bitüm oranlarında (agrega ağırlığınca) briketler hazırlanmıştır. YYPE<sub>PV</sub> ve YYPE<sub>PÇV</sub> modifiyeli bitümler kullanılarak hazırlanan IKA numuneler ile saf bitüm kullanılarak hazırlanan BSK numuneler Tablo 3'te belirtilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklığında hazırlanmış olup, bu aşamada YYPE<sub>PÇ</sub> modifiyeli bitüm (IKA özelliği yeterli olmadığı için) kullanılarak karışım hazırlanmamıştır. Şekil 5, ilgili karışımlara ait stabilite ve akma sonucunu göstermektedir. Grafik incelendiğinde görülüyor ki, hem IKA hem de BSK numuneler %4 bitüm

oranında maksimum stabiliteye ulaşmıştır. BSK'nın maksimum stabilite değeri 14,15 kN olarak ölçülürken, onu sırasıyla 12,23 kN ile YYPE<sub>PÇV</sub> katkılı IKA ve 10,75 kN ile YYPE<sub>PV</sub> katkılı IKA takip etmiştir. Sadece vaks ilavesi ile hazırlanan IKA karışımının (YYPE<sub>PV</sub>) maksimum stabilite değerinin BSK'nın maksimum stabilitesine oranı %76 olarak belirlenmiştir. Vaks ve çarın birlikte kullanıldığı IKA'da ise bu oran %87 seviyelerine ulaşmıştır. Öte yandan, tüm sonuçların Karayolu Teknik Şartnamesi Aşınma Tabakası Stabilite Limiti olan 900 kg (8,83 kN) değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Akma sonuçları incelendiğinde, stabilitesi yüksek olan karışımın akma değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. BSK ve IKA'lara ait Marshall stabilite ve akma değerleri

### 4. Sonuçlar

Çalışmada, YYPE pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin IKA üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çar ve vaks ürünler (bitüm ağırlığınca %

oranında olmak üzere) hem ayrı ayrı hem de birlikte bitümle modifiye edilerek 3 farklı formda katkılı bitüm (YYPE<sub>PV</sub>, YYPE<sub>PÇV</sub> ve YYPE<sub>PÇ</sub>) hazırlanmıştır. Hem saf hem de katkılı bitümlere penetrasyon, yumuşama

noktası ve rotasyonel viskozimetre testleri yapılmıştır. Ayrıca, BSK ve IKA karışımlara Marshall stabilite-akma analizleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Saf ve katkıli bitümlerin penetrasyon değerleri incelendiğinde şöyle bir sıralama oluşmuştur:  $YYPE_{PV}$  modifiyeli bitüm >  $YYPE_{PCV}$  modifiyeli bitüm > Saf Bitüm >  $YYPE_{PC}$  modifiyeli bitüm. Bu sıralama incelendiğinde, çarın ilavesi ile bitümün sertleştiği, vaksın ilavesi ile ise, bitümün yumuşadığı görülmektedir. Vaks ve çarın birlikte bitüme katılması durumunda ise, modifiye bitümün, saf bitümden daha yumuşak özellikte olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç, vaksın bitüm içerisinde daha baskın bir rol oynadığını göstermiştir. Yumuşama noktasındaki sıralama ise, beklendiği gibi yukarıda belirtilen sıralamanın tam tersi şeklinde olmuştur.
- Viskozite sonuçları, vaks ürününün etkisi ile bitümün viskozitesinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bu azalma neticesinde  $YYPE_{PV}$  ve  $YYPE_{PCV}$  modifiyeli bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri saf bitümden sırasıyla  $24^{\circ}C$  ve  $14,5^{\circ}C$  daha düşük çıkmıştır. Çar ürün ise, bitümün viskozite değerini  $105^{\circ}C$ 'den sonra azaltmaya başlamış ancak bu azalma oldukça az miktarda olmuştur.

Bu sebeple sadece çar ürünün kullanıldığı  $YYPE_{PC}$  modifiyeli bitüm ile saf bitümün viskozite sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Buradan, IKA üretiminde katkı maddesi olarak sadece  $YYPE$  piroliz çarı kullanmanın yeterli olamayacağı çıkarımı yapılmıştır.

- Marshall stabilite sonuçları gösteriyor ki, bitümde sadece vaks ürün kullanımı ( $YYPE_{PV}$ ) ile hazırlanan IKA karışımın stabilitesi, BSK'nın stabilitesinin %76'sına ulaşmıştır. Bitüme vaks ile birlikte çar ilavesi ( $YYPE_{PCV}$ ) yapılarak IKA karışım hazırlandığında ise, bu oran %11 artarak %87 seviyelerine erişmiştir. Öte yandan, tüm sonuçların şartname limitini sağladığı görülmüştür.
- Akma değerleri incelendiğinde, şöyle bir sıralama olduğu gözlenmiştir:  $YYPE_{PV}$  katkıli IKA >  $YYPE_{PCV}$  katkıli IKA > BSK. Sıralamaya bakıldığında stabilite değeri düşük olan karışımın akma değerlerinin fazla olduğu görülmüştür.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde,  $YYPE_{PV}$  ve  $YYPE_{PCV}$  katkı maddelerinin IKA üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür.  $YYPE$  piroliz çarının tek başına kullanıldığı  $YYPE_{PC}$  modifiyeli bitümün IKA özelliklerinin ise yeterli düzeyde olmadığı anlaşılmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Hüseyin KÖSE'nin doktora tez çalışması kullanılarak hazırlanmıştır. Yazar, çalışmaya 2016-ÖYP-050 proje numarası ile destek veren Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı'na ve kıymetli yardımlarından dolayı Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e içtenlikle teşekkür eder.

## 5. Kaynaklar

- Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R. and Gul, K. (2014, March). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products, *International Journal of Green Energy*, vol. 12, pp. 663-671. doi: 10.1080/15435075.2014.880146.
- Al-Hadidy, A.I. (2006). Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Paving Materials, *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, vol.14 (2), pp. 36-50. doi: [10.33899/rengj.2006.46555](https://doi.org/10.33899/rengj.2006.46555)
- Al-Hadidy, A.I. and Tan, Y. (2009, September). Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol.21 (10), pp. 618-623. doi: 10.1061/.ASCE.0899-1561.2009.21:10.618.
- Almeida, A., Capitão, S., Estanqueiro, C. and Picado-Santosc, L. (2021, April). Possibility of incorporating waste plastic film flakes into warm-mix asphalt as a bitumen extender, *Construction and Building Materials*, vol.291, 123384. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123384.
- American Society for Testing and Materials. (2013). Standard No: ASTM D5/D5M-13. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard No: ASTM D36/D36M-14. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard No: ASTM D4402/D4402M-15. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard No: ASTM D6926-20. Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus.
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard No: ASTM D6927-15. Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures
- Appiah, J.K., Berko-Boateng, V.N., and Tagbor, T.A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana, *Case Studies in Construction Materials*, vol.6, pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>
- Arabani, M. and Pedram, M. (2016, May). Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles, *Construction and Building Materials*, vol.116, pp. 378-383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.105>
- Asphalt mix design methods*, (2014), Yer: Asphalt Institute.
- Attaelmanan, M., Feng, P.C. and Al, A. (2011, January). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, vol.25, pp. 2764-2770. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037.
- Cepeliogullar, O. and Putun, A.E. (2013). Utilization of two different types of plastic wastes from daily and industrial life, *International Conference on Environmental Science and Technology*. Cappadocia, Turkey.
- Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Peralta, J. and Oliveira, J.R.M. (2019). Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment, *Construction and Building Materials*, vol.198, pp.237-244.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279>.

- Hınısloğlu, S. and Ağar., E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, vol.58, pp.367-271. doi:10.1016/S0167-577X(03)00458-0
- Karayolu teknik şartnamesi*, (2013), Yer: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Kumar, S. and Singh, R.K. (2011, October-December). Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 28 (4), pp. 659–667. doi: :10.1590/S0104-66322011000400011.
- PlasticsEurope (the Association of Plastics Manufacturers in Europe) (2020, December). *Plastics – the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Retrieved September 4, 2021, from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview, *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp. 76-84. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.053
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y. (2011, February). Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, vol. 25 (2) , pp. 886–891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.097>

## EKLER

**Ek.1** Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait penetrasyon test sonuçları

Bitüm türü	Penetrasyon (1/10 mm)		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE <sub>PÇ</sub> modifiyeli bitüm	51	53	50
YYPE <sub>PÇV</sub> modifiyeli bitüm	238	250	242
YYPE <sub>PV</sub> modifiyeli bitüm	140	148	143

**Ek.2** Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait yumuşama noktası test sonuçları

Bitüm türü	Yumuşama Noktası (°C)		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE <sub>PÇ</sub> modifiyeli bitüm	54	54	54,5
YYPE <sub>PÇV</sub> modifiyeli bitüm	38	37,5	38
YYPE <sub>PV</sub> modifiyeli bitüm	44	43,5	44

**Ek.3** Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait viskozite test sonuçları

Bitüm türü	Viskozite (mPa.s) @135°C		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE <sub>PÇ</sub> modifiyeli bitüm	402,9	404,3	400,7
YYPE <sub>PÇV</sub> modifiyeli bitüm	158,3	159,8	156,3
YYPE <sub>PV</sub> modifiyeli bitüm	227,2	225,0	229,1