

# Elvaloy ve Polifosforik Asitle Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hakan AYDIN<sup>1</sup>, Erkut YALÇIN<sup>2\*</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>3</sup>, Taner ALATAŞ<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ.

e-posta: <sup>1</sup>ce.aydinhakan@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-1446>

\*Sorumlu Yazar e-posta: <sup>2</sup>erkutyalcin@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6389-4211>

e-posta: <sup>3</sup>mehmetyilmaz@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2761-2598>

e-posta: <sup>4</sup>talatas@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2762-0440>

Geliş Tarihi: 27.05.2022

Kabul Tarihi: 24.10.2022

## Öz

### Anahtar kelimeler

Elvaloy; PPA; Bitüm Modifikasyonu; Reolojik Özellikler

Kompleks ortamlarda asfalt kaplamaların performansını garanti etmek için stiren-bütadien-stiren (SBS), stiren bütadien kauçuğu (SBR), öğütülmüş araç lastiği (CR), ve polifosforik asit (PPA) gibi bazı malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanımına rastlanmaktadır. Bu çalışmada, Elvaloy ve PPA modifikasyonunun bitümlü bağlayıcının reolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Belirlenen üç farklı oran kombinasyonunda Elvaloy/PPA kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış, saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan 3 farklı bağlayıcının geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri) ve Superpave bağlayıcı deney (dinamik kayma reometre deneyi) sonuçları incelendiğinde kullanılan bu katkıların saf bağlayıcının performansını arttırdığı belirlenmiştir.

## Investigation of Physical and Rheological Properties of Elvaloy and Polyphosphoric Acid Modified Bitumen

### Abstract

### Keywords

Elvaloy; PPA; Modification; Rheological Properties

In order to guarantee the performance of asphalt coatings in complex environments, some materials such as styrene-butadiene-styrene (SBS), styrene butadiene rubber (SBR), crumb rubber (CR), and polyphosphoric acid (PPA) have been used in bitumen modification. During the modification methods, alternative additives have been used to enhance or supplement the conventional asphalt binder. In this study, the effects of Elvaloy PPA modification on the rheological and physical properties of the bitumen binder were investigated. In addition, the effect of the bituminous binder on the rheological and physical properties was also investigated. Modified bitumen was prepared by using Elvaloy/PPA additives prepared under the specified conditions, and traditional and Superpave binder tests were applied on pure and modified binders. As a result, when the traditional (penetration, softening point and viscosity tests) and Superpave binder test (dynamic shear rheometer experiment) results of 3 different binders used in the study were examined, it was determined that these binders increased the performance of the pure binder.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Genel olarak asfalt, karmaşık bir içyapıya sahip bir inşaat malzemesidir. Asfaltın kimyası ve içyapısının araştırılmasında (Lesueur *et al.* 1997, Turner ve Branthaver 1997, Bodan *et al.* 1982, Yen *et al.* 1992) yeni yöntemler ve teknolojiler kullanılmış olsa da içyapının tam olarak anlaşılması hala zor olmuştur. Genel olarak, asfaltın, asfalttenler ve maltenlerle

temsil edildiği gibi farklı seviyelerde polariteye ve molar kütlelere sahip karmaşık bileşiklerden oluşan bir koloidal sistem olduğu kabul edilmiştir (Anderson 1988). Asfaltın maltenlerde dağılımı derecesi ve hidrokarbonların karakteri, asfaltın yorulma çatlama, tekerlek izine direnç, düşük sıcaklıklarda çatlama karşı direnç ve oksidasyona direnç gibi fiziksel özelliklerini etkilemiştir. Asfalt

karışımlarda oksidasyon olayı bitümün sertleşmesine neden olarak, asfalt karışımları kırılğan ve çatlamaya karşı savunmasız hale getirmektedir (Baginska *et al.* 2004).

Mühendislik özelliklerini iyileştirmek için asfalt genellikle polimerler tarafından modifiye edilmektedir. Polacco ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, asfaltın termomekanik özelliklerini büyük ölçüde geliştirdiğini belirlemişlerdir (Polacco *et al.* 2005). Polimer içeriği genellikle ağırlıkça %2 ile %5 aralığındadır; daha yüksek bir polimer içeriği ekonomik bir dezavantaj olarak kabul edilmiştir.

Asfalt endüstrisinde kullanılan en başarılı polimer grubu termoplastik elastomerlerdir. Termoplastik elastomerlerin asfalta ilavesi durumunda, kopolimerin bütadien fazı, yağ fraksiyonlarının (yani, maltenlerin) emilmesiyle şişmiştir. Sonuç olarak, polimerin orijinal hacmi yaklaşık 4 ile 10 kat artmıştır. Bu olgu, bir asfalt karışımında üç boyutlu (3D) bir polimerik ağı geliştirilmesinin anahtarı olarak belirlenmiştir; SBS elastomerik özellikleri tüm karışıma geçirmiş ve erime kabiliyetini yüksek sıcaklıklarda korumuştur (Drobny 2005). Polimerler ısı ve basınç etkisine veya bir katalizörün etkisine maruz kaldığında çapraz bağlanma gerçekleşmiştir. Bu koşullar altında, polimerin molekülleri arasındaki kovalent bağlarla dahili bir 3 boyutlu ağ oluşturulmuş ve bu da erime veya çözünme yeteneğinin kaybına neden olmuştur. Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş termoplastik elastomerler, epoksi halkaları içeren etilen bazlı kopolimerler ve son zamanlarda piyasada bulunan etilen terpolimerleri, glisidimetakrilat ve bir ester grubu (genellikle metil, etil veya butilakrilat) hepsi asfalt modifikasyonu için kullanılan RET'e ait bir sınıfa girmiştir (Drobny 2005).

RET modifikasyonu asfalt ile uyumluluğunu artırsa da, erime kabiliyeti olmayan bir polimer asfalt jeli ile sonuçlanan kimyasal bağlar oluştuğunda böyle bir sistemin kürlenmesine dikkat edilmelidir (Yu *et al.* 2009, Perez-Lepe *et al.* 2007). Sonuç olarak, asfaltın modifikasyonu için daha düşük miktarlarda RET kullanılması gerekmiştir (Guo *et al.* 2001). Bu nedenle RET, PMA karışımlarının uygulanmasını sınırlandırmıştır. Bununla birlikte, laboratuvar testleri deformasyonlara ve yorulma çatlağına karşı üstün direnç göstermiştir.

ABD'de PPA 1970'den beri asfalt karışımlarının mühendislik özelliklerini geliştirmek için kullanılmıştır (Baumgardner *et al.* 2005). Bununla birlikte, bu asfalt modifikasyonunun mekanizması, literatürde ifade edilen çeşitli görüşler Orange *et al.* (2004) ve Edward *et al.* (2006) ile hala tam olarak anlaşılmamıştır. Genel bir kural olarak, az miktarda PPA (ağırlıkça% 0,5) eklenmesi, termal işlemler sırasında oluşan kararsızlaştırıcı bileşenlerle reaksiyona girerek düz çalışan asfaltların sıcaklığını ve yaşlanma dirençlerini değiştirebilme olasılığı belirlemişlerdir. Aynı yazarlar, PPA ilavesinin, mum ilavesinden daha az bir ölçüde olsa da düşük sıcaklıklarda asfaltı sertleştirdiğini gözlemlemişlerdir. Daha yüksek sıcaklıklarda sertliği artırarak tekerlek izi parametreleri üzerindeki olumlu etki de tartışılmıştır. Yaşlanmaya karşı direnç (Daranda *et al.* 2009), PPA ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının avantajları arasında olduğunu belirlemişlerdir. PPA, asfaltın yüksek servis sıcaklıklarını değiştirirken, bu tür bağlayıcıların düşük servis sıcaklıkları çoğunlukla değişmeden kalmıştır. Asfaltın PPA ile modifikasyonunun ana nedeni, iyileştirilmiş işleme koşulları, yüksek sıcaklıkta viskozite ve depolama stabilitesi için gereken polimer miktarının sınırlandırılması olarak belirlenmiştir (Trakarnpruk *et al.* 2005).

Bu katkılar, yollarda yaygın olarak görülen tekerlek izlerine ve düşük/yüksek sıcaklık hassasiyetlerine karşı olağanüstü bir dirence ve performansa sahip oluşu ve yorulma çatlaklarının oluşmasına karşı muazzam ölçüde koruma sağladığından dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. Ekonomik açıdan bu katkılar SBS elastomerine göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte, bu tür bir modifikasyon, asfalt bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını artırabilmektedir. Bu çalışmada, Elvaloy ve polifosforik asitin birlikte kullanılmasının bitümlü bağlayıcının reolojik ve fiziksel özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır (Çizelge 1). Saf bağlayıcı Elvaloy ve PPA

katkıları ile modifiye edilmiştir. Elvaloyun özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Bu çalışmada Elvaloy ve PPA üç farklı oranda (0,8%+%2, %0,9+%1 ve %1+%0) karıştırılarak saf bitüme ilave edilerek hedef bağlayıcılar hazırlanmıştır. Elvaloy içeren bitümler, 5 saat boyunca 800 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra bu karışıma PPA eklenerek 30 dakika daha karıştırılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve Elvaloy/PPA içeren bağlayıcıların çalışmada kullanılan kısaltmaları Çizelge 3’te verilmiştir.

**Çizelge 1.** Bitümün özellikleri

Özellikler	Birim	Standart	Sonuçlar
Penetrasyon	mm <sup>-1</sup>	EN 1426	62
Yumuşama noktası	°C	EN 1427	53,3
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	0,119
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	245
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D70 - 18a	1,044
Karıştırma sıcaklığı	°C	-	167,5–173,3
Sıkıştırma sıcaklığı	°C	-	155,2–160,6

**Çizelge 2.** Elvaloy RET polimerinin genel özellikleri

Özellikler	Deney standardı	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Doğrusal
Özgül ağırlık	ASTM D-792	0,94
Hacim özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )		0,557
Erime noktası (°C)	ASTM D-3418	72

**Çizelge 3.** Bitümlü bağlayıcılar için kullanılan kısaltmalar

Kullanılan katkı	Bağlayıcı ağırlığına kullanılan katkı oranı (%)			
Elvaloy	0,8	0,9	1	0
PPA	0,2	0,1	0	0
Gösterim	E1	E2	E3	Saf

### 2.1 Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

25°C’de penetrasyon deneyi (ASTM D5) ve yumuşama noktası deneyi (ASTM D36) 5°C’de yapılmıştır. Bu deneyler sayesinde bağlayıcıların fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirlemek amacıyla yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinin değerleri kullanılarak

bulunan indekse Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri belirlenmiştir. Denklem 1’deki Pen25 Bitümün 25°C’deki penetrasyon değerini; YN ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir (Whiteoak *et al.* 2004).

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

### 2.2 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Modifiye edilmiş ve saf bitüm örnekleri, 135°C ve 165°C’lik sıcaklıklarda viskozite testine tabi tutulmuştur. Bu amaçla AASHTO T316 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (AASHTO, 2008). Bağlayıcıların viskozi değerleri işlenebilirlik sınırı şartı olan 3 Pa.s’yi aşmaması istenmektedir (Airey 2004, Airey 2003, Vlachovicova *et al.* 2007).

### 2.3 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

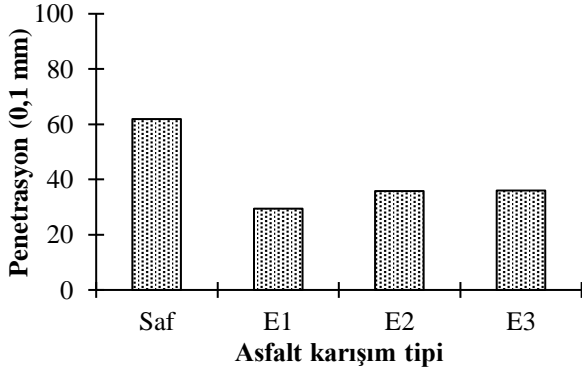
Sıcaklık kontrollü ve bitümlü bağlayıcı numunelerinin bulunduğu deney düzeneğine belirli bir salınımlı kayma gerilmesi uygulanır. Gerilmeye bağlı bağlayıcının şekil değiştirmesi tayin edilir. Alternatif olarak deney numunesine belirli bir salınımlı kesme gerilimi uygulanır ve son kayma gerilmesi ölçülür. Bu deney lineer viskoelastik davranış bölgesinde uygulanır. Dinamik kayma reometresi (DSR) ve paralel deney geometresi kullanılarak bitümlü bağlayıcıların kompleks kesme modülü ve faz açısının belirlenmesini içermektedir. Faz açısı değeri azaldıkça bağlayıcıların elastikiyetlik özelliğinde artma meydana gelmektedir. Tekerlek izi parametresi yaşlandırılmamış saf bağlayıcılar için için 1,0 kPa’dan daha büyük değerde olması gerekmektedir. DSR deneyi 25 mm çapında plak ve 1 mm plak açıklığı ile 1,59 Hz frekans değerinde 52-88°C’de yapılmıştır (Zaniewski *et al.* 2004).

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1 Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Elvaloy+PPA modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Saf bağlayıcıya göre

penetrasyon değerinde en fazla azalma E1 bağlayıcısında görülmektedir. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı penetrasyon değerinde önemli ölçüde azalma meydana getirmiştir. Fakat Elvaloyun tek başına kullanılması penetrasyon değerini azaltsa da ikili kullanım kadar azaltmamaktadır. E1, E2 ve E3 modifikasyonun penetrasyon değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %52,2; %41,9 ve %41,6 azaltmıştır.

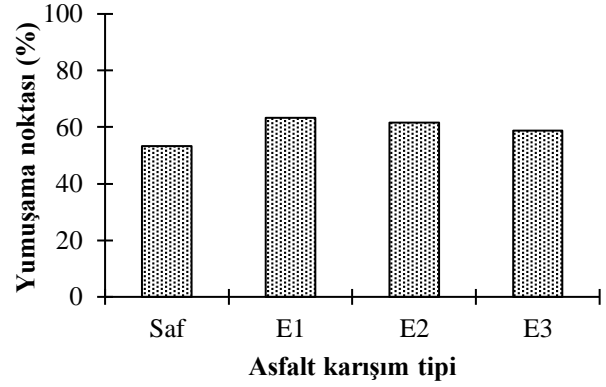


Şekil 1. Penetrasyon değerlerindeki değişiklik

Geçkil ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Elvaloy RET katkısının bağlayıcı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elvaloy RET katkılı bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon değerlerinde azalma olduğunu belirlemişlerdir (Geçkil *et al.* 2019). Yapılan bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.2 Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

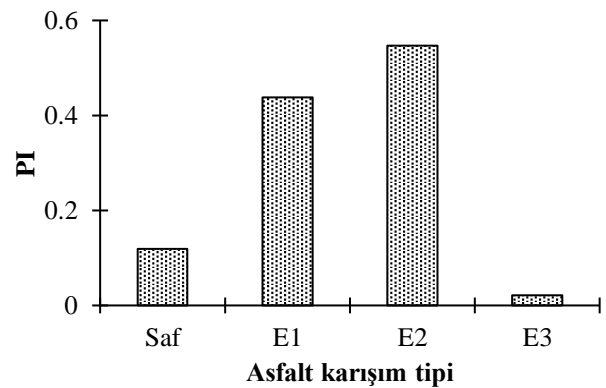
Şekil 2'de tüm bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları verilmiştir. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı yumuşama noktası değerini artırmıştır. En yüksek yumuşama noktası değerini E1 bağlayıcısı vermektedir. E1, E2 ve E3 bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %16,67; %15,48 ve %10,23 artırmıştır. Her iki katkı maddesi de bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklık direncini artırmaktadır.



Şekil 2. Yumuşama noktası değerlerindeki değişiklik

Geçkil ve arkadaşları yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak Elvaloy kullanmışlardır. Saf bağlayıcıya Elvaloy ilavesi yumuşama noktası değerlerinde artış meydana getirmektedir (Geçkil *et al.* 2019). Benzer sonuçlar bu çalışmada da elde edilmiştir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, bağlayıcının yumuşaklığını ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellikte oldukları için soğukta sert, sıcakta ise akışkan hale gelebilmektedirler. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır. Penetrasyon İndeks değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir. Bağlayıcıların PI değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



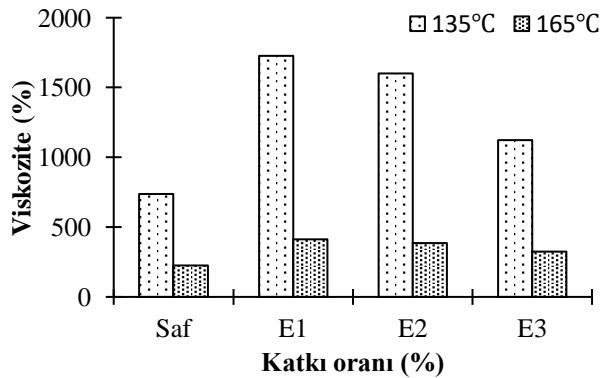
Şekil 3. Bağlayıcıların PI değerleri

E2 modifiye bitüm en yüksek PI değerini vermektedir. E1 ve E2 modifiye bitüm, saf bağlayıcıdan yüksek PI değerlerine sahiptir. E1 ve E2 modifiye bağlayıcıları, saf bitüm ile

karşılaştırıldığında sırasıyla yaklaşık 3,7 ve 4,6 kat daha yüksek PI değerine sahiptir.

### 3.3 Dönel viskozimetre deneyi

Şekil 4'te bağlayıcıların 135°C ve 165°C'deki viskoziteleri üzerindeki değişimi sırasıyla verilmektedir. 135°C'de bağlayıcıların viskozite değerleri Elvaloy+PPA katkıları ile hazırlanan modifiye bitümdeki Elvaloy oranı arttıkça hem 135°C hem de 165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinde azalış gözlenmektedir. 135°C'de en yüksek E1 içeriğinde bile sınır şartı olan 3 Pa.s viskozite değerini aşmamasından dolayı herhangi bir işlenebilirlik problemi teşkil etmez. En düşük viskozite değerini ise saf bağlayıcı vermektedir. Viskozite eğilimindeki değişim her iki sıcaklık içinde benzerdir. E1, E2 ve E3 bağlayıcıların, 135°C'deki viskozite değerleri saf bitüm ile karşılaştırıldığında sırasıyla 2,34; 2,17 ve 1,53 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. 165°C'de ise sırasıyla 1,83; 1,72 ve 1,44 kat daha fazla viskozite değeri vermektedir (Şekil 5). Tek başına Elvaloy katkısının kullanımı Elvaloy ve PPA birlikte kullanıldığı bağlayıcılara göre daha fazla viskozite değeri verdiği belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcıların içerisindeki PPA miktarı arttıkça, modifiye bağlayıcıların viskozite değerlerinde artış meydana gelmektedir.

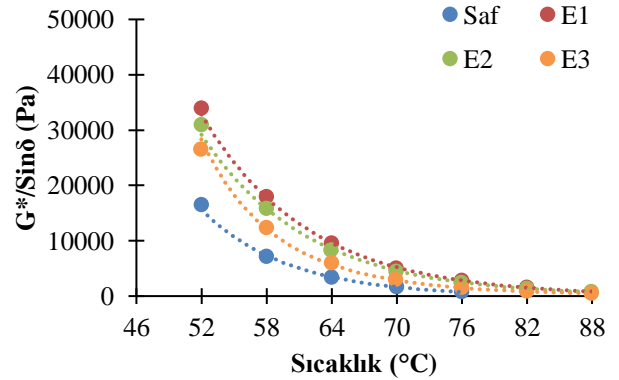


Şekil 4. 135°C ve 165 °C'deki bağlayıcıların viskozite değerleri

Bu sonuçların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçların literatürde yer alan sonuçlarla da uyumlu olduğu belirlenmiştir (Geçkil *et al.* 2019).

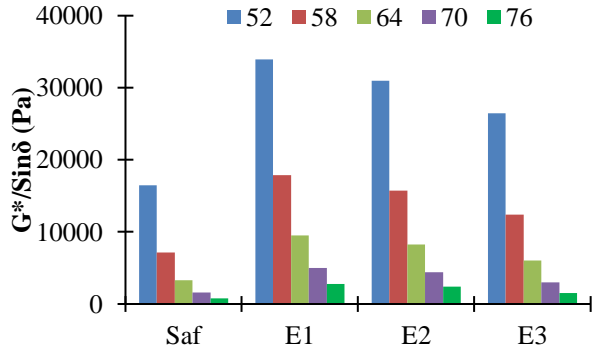
### 3.4 DSR Deney Sonuçları

Şekil 5'te bütün bağlayıcılar için tekerlek izi parametreleri ile sıcaklık arasındaki ilişki verilmiştir. Bağlayıcıya uygulanan sıcaklık arttığında, bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinde azalma meydana gelmektedir. Kalıcı deformasyon, tekerlek izi parametresini ( $G^*/\sin\delta$ ), yaşlanmamış orijinal bağlayıcılar için 1,0 kPa'dan daha büyük değerlerle sınırlandırarak kontrol edilir. DSR deneyinde, her bir 6°C'lik sıcaklık artışında bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinde yaklaşık %50 azalma meydana gelmektedir. Saf bağlayıcının  $G^*/\sin\delta$  sınır değerini 64°C'de sağlarken, E1, E2 ve E3 bağlayıcıları 76 °C'de sırası ile 2757 Pa, 2404 Pa ve 1518 Pa  $G^*/\sin\delta$  değeri vermektedir. E1 ve E2 bağlayıcısı 82°C'de sınır şartını sağlarken, E3 bağlayıcısı 1000 Pa limit değerini sağlamadığı belirlenmiştir. E1 ve E2 bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerindeki değişim birbirlerine benzerdir.



Şekil 5.  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 6'da  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin Elvaloy/PPA katkı içeriği ile değişimi verilmiştir. İki şekilde de görüldüğü üzere PPA içeriği arttıkça  $G^*/\sin\delta$  değerleri de artmaktadır. Elvaloy içeren bağlayıcı Elvaloy+PPA içeren bağlayıcılara göre daha düşük  $G^*/\sin\delta$  değerleri vermektedir. Sıcaklık değeri arttıkça tüm bağlayıcıların  $G^*/\sin\delta$  değerleri azalmaktadır. Tüm sıcaklıklarda en yüksek  $G^*/\sin\delta$  değerlerini E1 bağlayıcısı verirken en düşük  $G^*/\sin\delta$  değerlerini ise saf bağlayıcı vermektedir.  $G^*/\sin\delta$  değerleri literatürde yer alan sonuçlarla da uyumlu olduğu belirlenmiştir (Geçkil *et al.* 2019).



Şekil 6. Elvaloy/PPA içeriği ile G\*/sinδ değişimi

#### 4. Sonuçlar

Çalışmasında Elvaloy ve PPA katkılarının, bitümlü bağlayıcı performanslarına etkileri araştırılmış ve saf bağlayıcı ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada reolojik özelliklerini belirlemek için 3 farklı oranda Elvaloy+PPA kullanılmıştır.

- Elvaloy+PPA modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. E1 bağlayıcısının penetrasyon değeri saf bağlayıcının penetrasyon değerine göre düşüktür. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı penetrasyon değerinde önemli ölçüde azalma meydana getirmiştir.
- Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı yumuşama noktası değerini artırmıştır. En yüksek yumuşama noktası değerini E1 bağlayıcısı vermektedir. Penetrasyon deney sonuçlarında olduğu gibi Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı tek Elvaloy kullanımına göre daha iyi sonuç vermektedir.
- E2 modifiye bitüm en yüksek PI değerini vermektedir. E1 ve E2 modifiye bitüm, saf bağlayıcıdan yüksek PI değerlerine sahiptir. Elvaloy ve PPA katkılarının kullanılması sıcaklık duyarlılığı üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir.
- Elvaloy+PPA katkıları ile hazırlanan modifiye bitüm içerisindeki Elvaloy oranı arttıkça hem 135°C hem de 165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinde azalış meydana gelmektedir. Bununla birlikte, 135°C'de tüm bağlayıcılar sınır şartı olan 3 Pa.s viskozite değerini aşmamaktadır. Buda işlenebilirlik açısından sorun teşkil etmediğini göstermektedir. En

düşük viskozite değerini ise saf bağlayıcı vermektedir. Her iki sıcaklıkta da viskozite sonuçlarında benzer değişim görülmektedir.

- Bağlayıcılara uygulanan sıcaklık değeri arttıkça G\*/sinδ değeri azalmaktadır. Bütün bağlayıcılarda bu azalış meydana gelmektedir. Ayrıca bağlayıcıya sadece Elvaloy ilavesi G\*/sinδ değerlerini her sıcaklıkta yaklaşık olarak sırasıyla 1,5 veya 2 kat artırmaktadır.
- Katkı maddeleri saf bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini düşürmüştür. Elvaloy ve PPA ilavesi saf bağlayıcının bağlayıcı sınıfını değiştirmektedir. Bu sebeple kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi oluşumlarını önlemek veya azaltabilmek için Elvaloy/PPA bir katkı maddesi olarak kullanılması durumunda faydalı olabileceği ve iyi bir performans göstereceği söylenebilmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- Airey, G.D., 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, **82(14)**, 1709–1719.
- Airey, G.D., 2004. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal Material Science*, **39**, 951–959.
- Anderson, J.L., 1988. *Advanced in Chemical Engineering*, Academic Press, 98–134.
- Baginska, K. and Gawel, I., 2004. Effect of origin and technology on the chemical composition and colloidal stability of bitumen. *Fuel Processing Technology*, **85**, 1453–1462.
- Baumgardner, G.L., Masson, J.F., Hardee, J.R., Menapace, J.R. and Williams, A.G., 2005. Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms. *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, **74**, 283–305.
- Bodan, A.N., 1982. Polyquasispherical structure of petroleum asphalts. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **18**, 614–618.
- Daranga, C., Clopotel, C., Mofolasayo, A. and Bahia, H., 2009. Storage stability and effect of mineral surface on polyphosphoric acid (ppa) modified asphalt binders, presented during poster session. *88th Annual*

- Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2–11.
- Drobny, J.G., 2007. Handbook of Thermoplastic Elastomers, William Andrew Inc., 161–175.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacson, U., 2006. Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 — low temperature performance. *Fuel*, **85(8)**, 989–997.
- Geçkil, T. and Seloğlu, M., 2019. Reaktif Terpolimerin Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Duyarlılığına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **31(1)**, 203–213.
- Guo, Q., Figueiredo, P., Thomann, R. and Gronski, W., 2001. Phase behavior, morphology and interfacial structure in thermoset/thermoplastic elastomer blends of poly(propyleneglycol)-type epoxy resin and polystyrene-b-polybutadiene. *Polymer*, **42**, 10101–10110.
- Lesueur, D., Gérard, J.F., Claudy, P., Létoffé, J.M., Planche, J.P. and Martin, D., 1997. Relationships between the structure and the mechanical properties of paving grade asphalt cements. *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, 486–507.
- Orange, G., Dupuis, D., Marin, J.V., Farcas, F., Such, C. and Marcant, B., 2004. Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties–microstructure relationship. *3rd Euraphalt & Eurobitume Congress*, Vienna, 733–745.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J. and Gallegos, C., 2007. High temperature stability of different polymer-modified bitumens: a rheological evaluation. *Journal of Applied Polymer Science*, **103**, 1166–1174
- Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J. and Zanzotto, L., 2005. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, **41(12)**, 2831–2844.
- Trakarnpruk, W. and Chanathup, R., 2005. Physical and rheological properties of asphalts modified with polyethylene-co-methylacrylate and acids. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **15**, 79–87.
- Turner, T.F. and Branthaver, J.F. D.S.C., Studies of asphalts and asphalts components, in: A.M. Usmani (Ed.), *Asphalt Science and Technology*, 59–101.
- Vlachovicova, Z., Wekumbura, C., Stastna, J. and Zanzotto, L., 2007. Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene–butadiene–styrene copolymer. *Construction and Building Materials*, **21(3)**, 567–577.
- Yen, T.F., 1992. The colloidal aspect of a macrostructure of petroleum asphalt. *Fuel Science-Technology International*, **10**, 723–733.
- Yu, J., Cong, P. and Wu, S., 2009. laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, **113**, 3557–3563.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E., 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt Technology Program*.
- Whiteoak, D., 2004. Shell Bitüm El Kitabı, Prof. Dr. Abdullah Hilmi Lav ve Prof. Dr. Ayşen Lav (çeviri editörü), İsfalt Bilimsel Yayınları, İstanbul.