






## Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers

Esma Sarışın<sup>1</sup> , Erkut Yalçın<sup>1</sup> , Jülide Öner<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Firat University, Elazığ, 23000, Turkey

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Usak University, Usak, 64000, Turkey

### Highlights:

- Bitumen samples were modified with hybrid polymers.
- The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the bitumen samples.
- The utilization of hybrid polymers improved the high temperature behavior of bitumen.

### Keywords:

- Bitumen
- Elastomer
- Plastomer
- Hybrid additive
- Rheology

### Article Info:

Research Article

Received: 26.03.2020

Accepted: 18.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

### Correspondence:

Author: Jülide Öner

e-mail:

julide.oner@usak.edu.tr

phone: +90 276 221 2746

### Graphical/Tabular Abstract

Hybrid modification is defined as the use of two different types of asphalt additives together to achieve an improved modification. Improving performance, reducing costs and utilizing waste materials are the main implementation objectives of the hybrid modification. In this study, the effects of elastomeric (styrene-butadiene-styrene (SBS), Kraton<sup>®</sup> D1101) and plastomeric (Titan<sup>®</sup> 7686) additives on the rheological properties of polymer modified bitumen were investigated. As a conclusion, environmental and economic benefits could be achieved by using hybrid polymers in bitumen modification instead of the high cost elastomer.

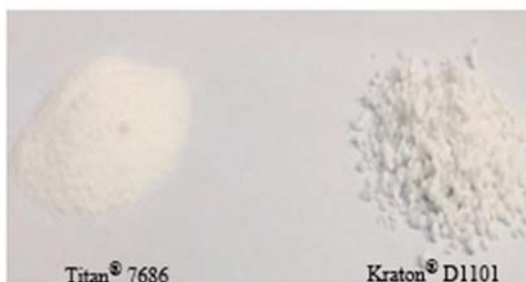


Figure A. Polymer additives used in hybrid form

### Purpose:

In the study, it is aimed to reduce the usage rate of the high cost elastomer and obtain a hybrid additive with the addition of a lower cost plastomer, thereby producing a more economical hybrid polymer with similar performance with elastomer modified bitumen.

### Theory and Methods:

For the purpose of the study, following to the preparation of modified bitumen samples with hybrid polymers, effects of additives on the rheology of bituminous binders have been evaluated by Dynamic Shear Rheometer and Bending Beam Rheometer tests at high and low temperatures respectively.

### Results:

The utilization of hybrid polymers resulted in improved rutting resistance performance at both low and high frequencies. Besides it was also found that 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive has more pronounced effect against rutting compared to the modification with SBS polymer. Bitumen samples containing plastomer additive exhibited the highest  $G^* \cdot \sin \delta$  value at all intermediate temperatures. Higher  $G^* \cdot \sin \delta$  values is not preferable since the samples with higher  $G^* \cdot \sin \delta$  values exhibit fatigue cracking. According to the Bending Beam Rheometer test results applied on long-term aged modified bitumen samples in order to determine the low temperature performance, it was determined that polymer and hybrid polymer modification process did not change the low temperature performance level of bituminous binders.

### Conclusion:

Within the scope of this study, modification process was carried out using two different commercial polymers. It was determined that in case of using 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive, General Directorate of Highways specification requirements were met and similar performance was achieved with 4.5% SBS. Results indicated that polymer additives could be used together for higher rigidity and elastic behavior. The positive results obtained support the idea that environmental and economic benefits can be achieved by using hybrid polymers in bitumen modification.



## Hibrit polimerlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin incelenmesi

Esmâ Sarışın<sup>1</sup>, Erkut Yalçın<sup>1</sup>, Jülide Öner<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

### ÖNEÇİKANLAR

- Bitüm numuneleri hibrit polimerler ile modifiye edildi
- Plastomerik katkı, bitüm numunelerinin esneklik yeteneğini olumsuz etkiledi
- Hibrit polimerlerin kullanımı bitüm numunelerinin yüksek sıcaklık davranışını iyileştirdi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 26.03.2020  
Kabul: 18.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

### Anahtar Kelimeler:

Bitüm,  
elastomer,  
plastomer,  
hibrit katkı,  
reoloji

### ÖZET

Uygulama bölgelerinde servis ömrü boyunca yeterli performans sağlayabilecek üstyapı kaplama tabakaları inşa edebilmek amacıyla uygun bağlayıcı seçimi büyük önem arz etmektedir. Trafik ve iklim koşullarından dolayı üstyapı kaplama tabakaları aşırı gerilmelere maruz kalmaktadır. Esnek üstyapı kaplama tabakalarının ana bileşenlerinden olan bitümlü bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli katkı malzemeleri modifikasyon amacıyla kullanılmaktadır. Modifikasyon yöntemiyle bitümlü bağlayıcıların mühendislik ve elde edilen asfalt karışımların mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Hibrit modifikasyon, geliştirilmiş bir modifikasyon elde etmek için iki farklı tipte asfalt katkı malzemesinin birlikte kullanılması yöntemidir. Bağlayıcı ve karışımların performanslarının iyileştirilmesi, maliyetlerin azaltılması ve atık malzemelerden faydalanılması hibrit modifikasyonun başlıca amaçlarındandır. Çalışma kapsamında, elastomerik (stiren-butadien-stiren (SBS), Kraton® D1101) ve plastomerik (Titan® 7686) katkı maddeleri ve bunların kombinasyonunun bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda hem elastomerik hem de plastomerik katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği belirlenmiştir. Plastomerik katkı maddesi bağlayıcıların esnekliğini olumsuz etkilemiştir. Katkıların birlikte kullanımı değerlendirildiğinde %3,5 SBS +%1,0 Plastomerik katkı kullanılması durumunda Karayolları Genel Müdürlüğü şartname gereksinimlerinin karşılandığı, %4,5 SBS ile benzer performans seviyesinin sağlandığı tespit edilmiştir.

## Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers

### HIGHLIGHTS

- Bitumen samples were modified with hybrid polymers
- The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the bitumen samples
- The utilization of hybrid polymers improved the high temperature behavior of bitumen

### Article Info

Research Article  
Received: 26.03.2020  
Accepted: 18.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.709653

### Keywords:

Bitumen,  
elastomer,  
plastomer,  
hibrit additive,  
rheology

### ABSTRACT

In the application areas, the selection of suitable binders is of great importance in order to build superstructure coating layers that can provide sufficient performance throughout the service life. Due to traffic and climate conditions, the superstructure coating layers are exposed to excessive stresses. Various additives are used for modification in order to improve the properties of bituminous binders, which are one of the main components of flexible superstructure coating layers. With the modification method, the engineering properties of the bituminous binders and the mechanical properties of the asphalt mixes obtained can be improved. Hybrid modification is a method of using two different types of asphalt additives together to achieve an improved modification. Improving the performance of binders and mixtures, reducing costs and utilizing waste materials are among the main objectives of hybrid modification. In the study, the effects of elastomer (styrene-butadiene-styrene (SBS), Kraton® D1101) and plastomeric (Titan® 7686) additives and their combination on the rheological properties of the binders were investigated using bitumen modification. As a result of the experimental study, it has been determined that both elastomer and plastomeric additives improve the high temperature performance of bituminous binders. The plastomeric additive adversely affected the flexibility of the binders. When using the additives together, it was determined that if 3.5% SBS + 1.0% Plastomeric additive is used, the General Directorate of Highways specification requirements were met and a similar performance level was achieved with 4.5% SBS.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: esmasarisin@hotmail.com, erkutyalcin@firat.edu.tr, julide.oner@usak.edu.tr /

Tel: +90 276 221 2746

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde sürekli artan trafik hacimleri ve ağır yüklü taşıtlar nedeniyle asfalt kaplamalı karayolu üstyapılarının servis ömürleri önemli oranda azalmaktadır. Diğer yandan bitümlü malzemelerin sıcaklığa karşı duyarlılığı asfalt kaplamaların bozulmasını hızlandırmaktadır [1]. Hava sıcaklığının yüksek veya düşük olması, özellikle Türkiye gibi genellikle karasal iklimin hakim olduğu ülkelerde kaplama performansını olumsuz etkileyen başlıca sorunlar arasında yer almaktadır. Bitümlü bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek, bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmak, bitümün dayanıklılığını dolayısıyla kaplamanın hizmet ömrünü arttırmak, soyulma, tekerlek izi, yorulma ve yaşlanmaya karşı direnci arttırmak amacıyla başta polimerler olmak üzere çeşitli katkıları kullanılmaktadır [2].

Bitümlü bağlayıcılar, yüksek sıcaklıklarda akışkan ve düşük sıcaklıklarda kırılabilir özelliğe sahip sıcaklığa duyarlı viskoelastik malzemelerdir [3]. Bu nedenle sıcaklık ve uygulanan yük miktarı, bitümün reolojik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik karakteristiklerinin birbirlerinden farklı olmasının en önemli sebebi moleküler kombinasyonu tarafından oluşturulan elastik ağı çeşitliliğidir [4-6]. Bu viskoelastik dengenin, bir bitümlü bağlayıcı içinde polimer katkı maddeleri sayesinde moleküler birleşme yaratılarak oluşturulabileceği varsayılmaktadır [7, 8]. Etkili bir polimer, bitümlü bağlayıcı içinde moleküler etkileşimler yoluyla veya bağlayıcı ile kimyasal olarak reaksiyona girerek ikincil bir ağ veya yeni bir denge sistemi oluşturarak bitümlü bağlayıcı özelliklerini geliştirmektedir [9, 10].

Hibrit modifikasyonu, geliştirilmiş bir modifikasyon elde etmek amacıyla iki farklı tipte polimer modifiye katkı maddesinin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan yeni bir yöntemdir [11-14]. Hibrit modifikasyonu güncel bir konudur ve farklı katkıların birlikte kullanılarak bitüm modifikasyonunun etkisinin artırılması üzerine sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Selvavathi vd. 2007 yılında yaptıkları çalışmada, elastomer ve reaktif polimer katkılarının bir arada kullanımının bitüm modifikasyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, elastomer ve reaktif polimer kullanımıyla bitümlü malzemelerin kohezyon, adhezyon ve durabilite özelliklerinde dikkate değer gelişmeler gösterdiklerini vurgulamışlardır [15]. Mandrwalia vd. (2014) çalışmalarında stiren-butadien-stiren (SBS) polimeri ve polietilen polimerinin bir arada kullanımına yönelik bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. Çalışmada SBS polimerinin uygun üretim koşullarında, düşük oranlarda dahi ilavesinin bitümün viskoelastik özelliklerindeki iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar daha iyi dayanım, işlenebilirlik ve elastik davranışın kazanılması adına polietilen katkısının SBS katkısıyla birlikte kullanımının avantaj sağlayacağını vurgulamışlardır [16]. Öcal vd. (2018) yaptıkları çalışmada, modifiye bitümlerin tekerlek izi ve yorulma dayanım performansının geliştirilmesini amaçlamışlardır. Modifiye bitüm elde etmek

amacıyla katkı malzemesi olarak nano magnezyum spinel oksit ve kolemanit kullanılmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları, her iki katkıyı içeren modifiye bitüm numunelerin sünme rijitliğini arttırdığını göstermiştir [17]. Ghoreishi vd. (2018) bitüm modifikasyonunda elastomer tipi polimerler ile nano karbontüp ve nano kil malzemelerini hibrit kombinasyon şeklinde kullanmışlardır. Çalışma sonuçları, üç katkının bir arada kullanımıyla modifiye bitümlerin penetrasyon değerinin düştüğünü ve yumuşama noktası değerinin arttığını göstermiştir. Dolayısıyla araştırmacılar hibrit modifikasyon ile hazırlanan numunelerin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin azalacağı sonucuna ulaşmışlardır [11]. Kök vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada öğütülmüş atık araç lastiği ve FT-parafin ile hazırlanan bağlayıcıların reolojik ve geleneksel özelliklerini, stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyeli bağlayıcılarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar katkı maddelerinin farklı kombinasyonları için farklı performanslar sergilediğini göstermiştir. Atık araç lastiği, FT-parafin ve kombinasyonlarının yüksek sıcaklıkta SBS modifikasyonundan daha iyi bir performans gösterdiğini belirlemişlerdir [18]. Arslan vd. (2020) yaptıkları deneysel çalışmada, granit kayalardan elde edilen bir kil türü olan ve Türkiye’de arı kil olarak bilinen kaolin ilavesi ile modifiye bitüm örnekleri hazırlamışlardır. Test sonuçları, kaolin katkılı bitüm ile Marshall Stabilité değerinde %11,2’ye ulaşan artışlar elde edildiğini göstermişlerdir [19]. Yan vd. (2020) çalışmalarında çeşitli oranlardaki EVA ve düşük molekül ağırlıklı amorf plastik polimerlerini bitüm modifikasyonunda kullanarak geleneksel ve reolojik deneylerle bitüm üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, katkıların tek kullanımına kıyasla iki katkının hibrit modifikasyonu şeklindeki ilavesiyle bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık davranışlarının iyileştiğini, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı dirençlerinin arttığını ve yaşlanmaya karşı daha dirençli hale geldiklerini göstermişlerdir [14]. Ezzat ve Abed (2020) çalışmalarında plastomer ve elastomer tipi polimerlerin hibrit modifikasyonu olarak kullanımını değerlendirmiş, bu amaçla deneysel çalışmada iki farklı oranda (%1 ve % 3) polivinil klorür (PVC) ve %3 oranında SBS polimerinin bitümlü bağlayıcılarda kullanımını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda %3 oranında PVC ile %3 oranında SBS katkısının hibrit modifikasyonu ile hazırlanan test numunelerinin tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlak ve yaşlanma etkisine karşı orijinal bağlayıcılara kıyasla daha dirençli olduklarını belirtmişlerdir [12].

Elastomer grubu içerisinde yer alan ve yüksek maliyetlere sahip SBS polimerinin bitümlü bağlayıcılarda kullanılması viskoelastik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmektedir. Çalışmada, yüksek maliyetli SBS polimerinin kullanım oranının azaltılarak daha düşük maliyetli bir plastomer olan Titan® 7686 ilavesi ile hibrit katkı elde edilmesi, böylece SBS modifiyeli bitüm ile benzer performansa sahip daha ekonomik bir katkı üretilmesi amaçlanmıştır. İki farklı katkının tek başına bitüm reolojisi ve genel özellikleri üzerinde yaptıkları etkileri ortaya koyabilmek amacıyla saf

bitüme öncelikle ayrı ayrı %4,5 oranında Kraton® D 1101 katkısı ve %3 Titan® 7686 katkısı ilave edilmiştir. Daha sonra söz konusu her iki katkının birlikte kullanımının etkilerini inceleyebilmek amacıyla saf bitüm %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkılar ile modifiye edilmiştir. Elde edilen hibrit polimerlerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik ve geleneksel deneyler sonucundaki özellikleri belirlenerek test sonuçları yorumlanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada, İzmir Aliğa Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfına ait bağlayıcı kullanılmıştır. Saf bağlayıcıya ait geleneksel deney sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Elastomerler, mukavemet ve elastikliğini üç boyutlu ağların fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde etmektedirler. Polimere mukavemet kazandıran bileşen polistren uç bloklar olup orta bloklar (polibutadien) malzemeye esneklik sağlamaktadır [2, 4]. Elastomerin bitüm içerisinde dağılımı çok sayıda faktörden etkilenmekle birlikte bu faktörlerin arasında en önemlisi karıştırıcı tarafından uygulanan kesme kuvvetidir. Sıcak bitüme polimer eklendiğinde, bitüm hızlı bir şekilde polimer parçacıkları içerisine sızmaya başlamakta ve polimerin stiren ortamlarının çözülmesine ve şişmesine neden olmaktadır [4, 6, 8]. Karayolu uygulamalarında bitüm modifikasyonunda en fazla kullanılan katkı malzemesi SBS kökenli ve ticari

ismi Kraton® D 1101 olan üründür. Kraton® D 1101 elastomer modifikasyon katkısı ile bitüm dolayısıyla bitümlü karışımlar modifiye edilerek, yol üst yapılarının tekerlek izi oturması, agrega soyulması, ondülasyon oluşumu ve düşük sıcaklık çatlakları gibi olumsuzluklara karşı dirençli olmaları sağlanmaktadır [5, 6, 9]. SBS Kraton® D 1101 elastomer modifikasyon katkısına ait fiziksel özellikler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında SBS sınıfında incelenen Kraton® D 1101 katkısının [6, 7], üretici firmanın görüşleri ve yapılan ayrıntılı literatür çalışmaları ışığında, bitüme ağırlıkça % 3,5; %4,0 ve %4,5 içeriğinde eklenmesi uygun görülmüştür [12, 16, 18].

Plastomer türü polimerler, bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek, bağlayıcının kıvamını arttırmalarına rağmen bitümün elastikiyetini belirgin şekilde azaltmaktadırlar [1]. Isıtıldıklarında ayrışma sonrasında soğuma ile kaba bir dağılıma sebep olmaktadır. Bitümlü karışımlara plastomer ilavesi, sadece kaplamanın yüksek sıcaklık performansını iyileştirmek için uygulanmaktadır [3, 8]. Bu çalışmada Honeywell firması tarafından üretilen ve ticari adı Titan® 7686 olan plastomer türü modifiye katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Titan® 7686, yüksek sıcaklıkta polimerizasyon ve vaks oksidasyonu ile üretilmektedir. Titan® 7686 katkısının özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Ayrıca Kraton D1101 ve Titan® 7686 katkı maddeleri Şekil 1’de görülmektedir.

Asfalt karışımların adezyon özelliklerini artırarak suyun olumsuz etkilerine karşı dirençli hale getirmek ve

**Tablo 1.** Saf bitümlü bağlayıcının özellikleri (Properties of pure bituminous binder)

Test	Standartlar	Sonuçlar	Limitler
<b>Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler</b>			
Penetrasyon (25°C ; 0,1 mm)	TS EN 1426	57,3	50-70
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49,85	46-54
Elastik Geri Dönme (%)	TS EN 13398	8	-
Özgül Ağırlık	TS EN 15326	1,038	-
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	348	230<
<b>RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası</b>			
Kütle Kaybı (%)	TS EN 12607-1	0,044	<0,5
Kalıcı Penetrasyon (%)	TS EN 1426	92,7	%50<
Yumuşama Noktasındaki artış (°C)	TS EN 1427	7,55	<9

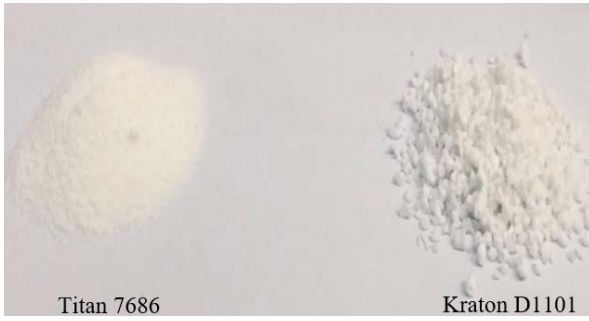
**Tablo 2.** Kraton® D 1101 polimerlerinin genel özellikleri [20] (General properties of Kraton® D 1101 polymers)

Kompozisyon	Standart	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Doğrusal
Stiren / Butadien oranı		31/69
Özgül ağırlık	ASTM D792	0,94
Çekme dayanımı (MPa)	ASTM D 412	33
Sertlik (MPa)	ASTM D 2240	72
Fiziksel hali		Granül
%300 katsayısı (N/mm <sup>2</sup> )		2,9
Akış katsayısı (g/10 min)	ASTM D 1238	<1
Uzama (%)	ASTM D 412	880
Yağ içeriği (%)	ASTM D 1546	<1

**Tablo 3.** Titan® 7686 polimerlerinin kompozisyonu ve fiziksel özellikleri [21]  
(Composition and physical properties of Titan® 7686 polymers)

Kompozisyon	Standart	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Yarı kristal
Özgül ağırlık	ASTM D792	0,99
Fiziksel hali		Toz
Hacim özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )		0,625
25°C'de Sertlik (dmm)	ASTM D 2240	<0,5
Erime noktası (°C)	ASTM D 3418	137

işlenebilirliği arttırmak Titan® 7686 modifikasyon katkısının kullanım amaçlarındandır. Üretici firmanın görüşleri ve yapılan ayrıntılı literatür çalışmalarının ışığında, bitüme ağırlıkça %3 içeriğinde eklenmesi uygun görülmüştür.

**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan katkı maddeleri  
(Additives used in the study)

### 2.2. Hibrit Polimerlerle Modifiye Edilmiş Bitüm Örneklerinin Hazırlanması

(Preparation of Modified Bitumen Samples with Hybrid Polymers)

Kraton D® 1101 ve Titan® 7686 polimer katkıları, bitüm laboratuvarlarında; 2 saat süresince 170°C'de, yüksek devirli karıştırıcı ile 5000 devir/dakika hızda belirlenen kullanım oranlarında saf bitüm ile karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen modifiye bitüm örnekleri cam behere aktarılmış ve beherin ağzı alüminyum folyo ile kapatılarak modifiye bitümün sıcak ortama doğrudan maruz kalması sonucu yaşanması engellenmiştir. Ardından, beher 170°C'ye ısıtılan etüve konulmuş, yaklaşık 16 saat olgunlaşma süresi için bekletilmiş, sürenin sonunda folyo açılmış ve 1000 devir/dakika hızda 10 dakika yüksek devirli karıştırıcı ile karıştırılarak test kalıplarına dökülmüştür. Çalışma kapsamında %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 olmak üzere iki farklı hibrit modifiye bitüm hazırlanarak incelenmiştir.

### 2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Saf bitüme uygun üretim reçetesinde %4,5 Kraton® D 1101, %3 Titan® 7686, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkıları ilave edilerek hazırlanan polimer modifiye (PMB) bitüm örnekleri üzerinde öncelikle fiziksel özelliklerin tespiti için; penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, parlama noktası, özgül ağırlık,

dönel ince film halinde ısıtma (RTFO), RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığı penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla penetrasyon indeksi değerleri hesaplanarak belirlenmektedir [22].

$$\frac{20-PI}{10+PI} = 50 * \frac{\log 800-pen}{T_{RB}-25} \quad (1)$$

Eş. 1'de pen, 25°C sıcaklıkta yapılan standart penetrasyon değerini, T<sub>RB</sub> ise yumuşama noktası (halka bilye metodu) değerini ifade etmektedir. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır [22].

Asfalt kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı gösterdikleri direnç dinamik kayma reometresi (DSR) ile tespit edilirken düşük sıcaklık davranışını belirleyebilmek amacıyla kiriş eğilme reometresi (BBR) cihazı kullanılmaktadır [23, 24]. Bitümlü bağlayıcıları farklı sıcaklıklardaki performanslarına göre değerlendirmek, ayrıca uygulama bölgesi iklim ve coğrafi şartlarını dikkate alarak bağlayıcıların kullanılabilirliğini tespit etmek geleneksel bağlayıcı deneylerinin yerine, performans dayalı deneyler yer almaktadır. Sistemde bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıkta viskoelastik davranışlarını değerlendirmek amacıyla dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi kullanılmaktadır [25, 26].

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G\*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G\*, tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G\* hem de δ değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yüklem hızı ile önemli ölçüde değişmektedir. Tekerlek izi açısından bağlayıcıların yeterli dayanıma sahip olabilmeleri için G\*/sin δ değeri orijinal (yaşlandırılmamış) bitüm için en az 1,00 kPa, dönel film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile yaşlandırılmış bitüm için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yüksekliğindedir [25-27]. Superpave şartnamesinde yorulma çatlağına karşı direnç, DSR cihazından elde edilen G\*.sinδ "yorulma çatlağı parametresi" ile değerlendirilmektedir. Bu faktörde, G\* kompleks kayma modülü, δ ise faz açısıdır. Yorulma çatlağı

oluşumuna karşı direnç açısından Superpave şartnamesine göre PAV sonrası yaşlandırılmış bitümden istenilen  $G^* \cdot \sin \delta$  değeri maksimum 5000 kPa'dır. Deneyde yükleme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye'dir (10 rad/s). Deneyde ortam şartlarını yansıtmaması amacıyla genelde 40°C'de deneye başlanmakta ve daha sonra test sıcaklığı 3°C azaltılarak standart deney tekrarlanmaktadır. Numune boyutları, yorulma çatlakları dayanımını tespit etmek için 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğindedir [25-27].

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki reolojik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kırış eğilme reometresi (BBR) deneyi kullanılmaktadır. Deney sıfırın altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve sabit yük uygulanan kırış şeklindeki bitümlü bağlayıcıda, bu yük altında belirli bir zamanda meydana gelen sehim değerlendirilmektedir. Deney sıcaklığı, asfaltın servis durumundaki karşılaşacağı en düşük sıcaklığa göre değişmektedir. Bu deneyde RTFOT ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri ile yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Böylece hizmet ömrü boyunca kısa ve uzun dönem yaşlanmaya maruz kalan bitümlü bağlayıcı deneyde temsil edilmiş olur. Deney bilgisayar kontrollü yapılmakta ve yine bilgisayar tarafından anlık zaman-deformasyon ile zaman-sünme sertliği grafikleri çizilerek 60 sn sonundaki sünme sertliği "S" ve sünme oranı "m" hesaplanmaktadır. 60 sn için sünme sertliği değeri 300 MPa dan büyük, m değeri 0,3'ten küçük olmamalıdır. Belirli bir ısıda ve sabit bir yük altında bağlayıcının ne kadar sünme veya şekil değişimi yapacağı ölçülmektedir. Bu deney için 6,25 mm yükseklik, 12,5 mm genişlik ve 125 mm uzunlukta

hazırlanan bitümlü bağlayıcı numunesi eksi derecelerde donmayan bir sıvı banyosu içinde 980 N ve 240 saniye süreyle tek nokta yüklemesine maruz bırakılmaktadır. Deney süresince birim şekil değişimi ölçülerek sünme sertliği aşağıdaki formül yardımıyla tayin edilmektedir [28, 29].

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)} \quad (2)$$

Eş. 2'de S(t): t anında sünme sertliğini (MPa), P: Uygulanan sabit yükü (N), L: Kırışın yük tatbik aralığını (102 mm), b: Kırış genişliğini (12.5 mm), h: Kırış yüksekliğini (6.25 mm),  $\delta(t)$ : t anında yer değiştirmeyi (mm) ifade etmektedir.

### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

#### 3.1. Geleneksel Bağlayıcı Deney Sonuçları (Traditional Binder Experiment Results)

Deneyssel çalışmalarda, saf bitüme uygun üretim reçetesinde %4,5 Kraton® D 1101, %3 Titan® 7686, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonundaki katkıları ilave edilerek hazırlanan polimer modifiye bitüm örnekleri üzerinde öncelikle fiziksel özelliklerin tespiti için; geleneksel bitüm deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcıların geleneksel özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları Tablo 4'te detaylı biçimde verilmiştir. Penetrasyon deneyi ile asfalt çimentolarının sertlik veya kıvamlılıkları tayin edilmektedir. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşamaktadır. Elastomer ve plastomer

**Tablo 4.** Bağlayıcıların geleneksel özelliklerini tespit etmek için yapılan deneylerin sonuçları  
(Results of experiments to determine the traditional properties of binders)

Test	Standartlar	Saf Bitüm	%4,5 Kraton® D 1101	%3 Titan® 7686	%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686
<b>Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler</b>						
Penetrasyon (25°C ; 0,1 mm)	TS EN 1426	57,3	37,475	37,925	36,825	38,525
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49,85	70,7	78,2	71,5	73,55
Elastik Geri Dönme (%)	TS EN 13398	8	85,3	*	78	*
Penetrasyon İndeksi (PI)		-0,93	2,22	3,37	2,31	2,73
Özgül Ağırlık	TS EN 15326	1,038	1,040	1,042	1,039	1,043
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	348	349,5	343,6	345,7	344,9
<b>RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası</b>						
Kütle Kaybı (%)	TS EN 12607-1	0,044	0,084	0,04	0,108	0,092
Kalıcı Penetrasyon (%)	TS EN 1426	92,7	73,9	80,6	95,5	85,7
Yumuşama Noktasındaki artış (°C)	TS EN 1427	7,55	1,05	1,8	0,85	6,0

\* %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 numunelerine ait Elastik Geri Dönme yüzdeleri sonuçları test örneklerinin kopmasından dolayı tespit edilememiştir.

katkılarının tek ve hibrit polimer şeklindeki bitüm modifikasyonlarında penetrasyon değerlerinin düştüğü ve beklendiği üzere yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı görülmektedir.

Yaşlanmadan sonraki penetrasyon değerleri dikkate alındığında; kısa dönem yaşlanma (RTFOT) ile bitümler daha sert hale gelmekte ve penetrasyon değerleri düşmektedir. Tablo 4 incelendiğinde; yaşlanmadan kaynaklı meydana gelen penetrasyon değerindeki en büyük değişimin, %4,5 Kraton® D 1101 katkısıyla modifiye edilen bitüm örneğinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4'te görüldüğü üzere yaşlanmadan sonraki yumuşama noktası değerleri göz önüne alındığında, bitümlerin yaşlanma sırasında yapılarındaki uçucu madde miktarı azalmış, dolayısıyla numunedeki yüzde asfalt oranı artmıştır. Buna bağlı olarak da bitüm örnekleri daha sert hale gelip yumuşama noktası değerleri yaşlanmadan önceki değerlerine kıyasla artmıştır. Yaşlanmayla beraber yumuşama noktasındaki en büyük artış saf bitüm numunesinde gözlemlenmiştir.

Bitüm örneklerinin penetrasyon indekslerindeki artış, bitümlerin sıcaklığa karşı duyarlılığının azaldığını göstermektedir. Penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde, polimer katkı kullanımı ile penetrasyon indeksi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Elastomer ve plastomer katkı ilavesi kendi içinde değerlendirildiğinde; plastomer katkı ilavesinin elastomer katkı ilavesine kıyasla bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri kendi içinde kıyaslandığında plastomer katkı oranının artırılıp elastomer oranının düşürüldüğü test örneklerinde (%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686) sıcaklığa karşı duyarlılığının en az olduğu tespit edilmiştir. Test örneklerinin elastik geri dönme yüzdeleri bir arada

değerlendirildiğinde, elastomer katkı ilavesiyle bitüm örneklerinin esneklik davranışının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca %0,5 oranından daha fazla Titan® 7686 katkısının bitüme ilavesinde numunelerin koptuğu gözlenmiştir. Dolayısıyla elastik geri dönme değerleri göz önüne alındığında Titan® 7686 katkısının en fazla bitüme ilave edilme oranının %0,5 olabileceği sonucuna varılmıştır. %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 numunesinin elastikiyet özelliğinin saf bitüm örneğine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 hibrit polimer modifiyeli bitüm ile üretilen asfalt kaplamaların elastikiyet açısından saf bağlayıcıya göre avantaj sağlayacağını göstermektedir.

### 3.2. DSR ve BBR deneyleri ile Katkılarının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojisine Etkilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of the Effects of Additives on the Rheology of Bituminous Binders by DSR and BBR Experiments)

Üretilen modifiye bitüm örnekleri üzerinde; katkı türünün (elastomer, plastomer ve hibrit polimer) etkisini tespit etmek amacıyla yüksek ve orta sıcaklıkta DSR, düşük sıcaklıkta ise BBR deneyleri uygulanmıştır.

Öncelikle, hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitüm örnekleri üzerinde, Superpave şartnamesinde belirtilen frekans değerinde (1,59 devir/saniye) ve farklı sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanarak  $G^*/\sin\delta$  parametresi elde edilmiştir. Her bir polimer ve hibrit polimer modifiye bitüm örnekleri üzerinde Superpave performans seviyesi (PG) üst sınıfını belirleyebilmek amacıyla farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR deneyi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda bağlayıcıların şartname gereksinimlerini sağlayabildiği son değerler kırmızı ile gösterilmiştir. Orijinal ve kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin  $G^*/\sin\delta$  değerleri incelendiğinde sıcaklık artışı ile  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu sonuç bitümlerin, sıcaklık artışı ile

**Tablo 5.** Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait performans sınıfı sonuçları  
(Performance class results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bitümler	Sıcaklık (°C)	DSR, $G^*/\sin\delta$ (Pa)		Performans Üst Sınıfı
		Orijinal	Yaşlandırılmış	
Saf Bitüm	64	1747,3	3642,2	PG 64
	70	822,7	1666	
	76	-	4791,2	
%4,5 Kraton® D 1101	82	1349,91	2609,53	PG 82
	88	803,056	1471,31	
	76	-	3626,77	
%3 Titan® 7686	82	1216,38	1923,09	PG 76
	88	714,994	1096,73	
	76	-	-	
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	82	1142,95	2514,44	PG 82
	88	695,951	1400,89	
	76	-	3374,97	
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	82	1560,38	3310,32	PG 82
	88	900,126	1828,51	

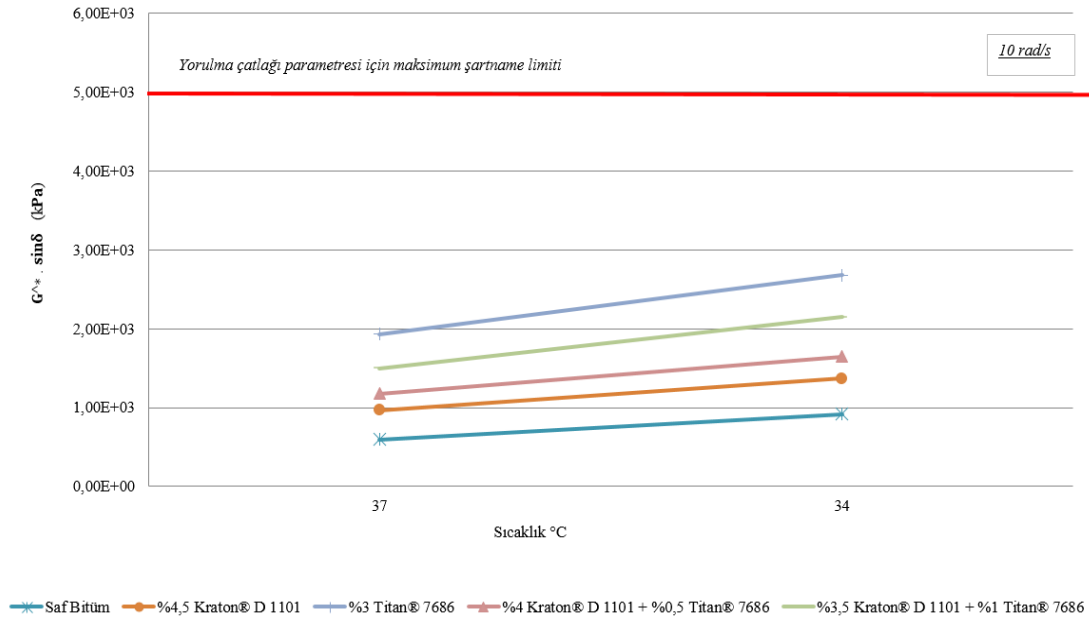
tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının azaldığının bir göstergesidir.

Test sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, elastomer ve plastomer katkılarının kullanımıyla bitümlerin performans sınıfı yüksek sıcaklık değerlerinin yükseldiği kaydedilmiştir. Bu artış, her bir polimer katkının tek başına ve hibrit kombinasyonu şeklinde kullanımı ile asfalt kaplamaların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli hale geldiklerini göstermektedir. Kısa dönem yaşlandırma prosedürüne tabi tutulan numunelerin tekerlek izi parametreleri incelendiğinde, tek başına %3 oranında Titan® 7686 kullanılan modifiye bağlayıcının performans sınıfı yüksek sıcaklık değerinin PG 76 olduğu, diğer katkılarla hazırlanan modifiye bitümlerin ise PG 82 olduğu tespit edilmiştir.

Hibrit polimer teknolojisinin bitüm modifikasyonunda kullanımı göz önüne alındığında, %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 kombinasyonu ile hazırlanan polimer modifiye bitüm örneklerinin yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı diğer modifiye bağlayıcılara kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlerin orta sıcaklıklardaki performansını belirleyebilmek amacıyla G\*.sinδ değerleri belirlenmiştir. Deneysel şartnamesine uygun olarak yüklem

frekansı 1,59 devir/saniye olarak seçilmiştir. PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış bitüm örnekleri üzerinde 34°C ve 37°C sıcaklıkta deney uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan modifiye bitümlerin orta sıcaklıktaki G\*.sinδ değerinin değişimi Şekil 2’de verilmektedir.

Şekil 2’de görüldüğü üzere; test edilen tüm bitüm örnekleri için sıcaklık düştükçe, G\*.sinδ değerleri artmıştır. Düşük G\*.sinδ değerlerine sahip bitümler yorulma çatlaklarına karşı daha dirençli olmaktadır. Her iki orta sıcaklıkta; saf bitüm numunesine kıyasla bütün polimerler G\*.sinδ değerlerini arttırmasına rağmen hem 34 hem de 37°C sıcaklıkta Superpave şartname limiti olan maksimum 5000 kPa gereksinimini sağlamıştır. Orta sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşumu bakımından en iyi performansı (en düşük G\*.sinδ değerleriyle), saf bitüm örnekleri göstermiştir. Plastomer katkısı ilavesiyle bitümlerinin orta sıcaklıktaki performans sınıflarını yükselttiği yani yorulma çatlaklarına karşı dayanımlarının daha düşük olabileceği tespit edilmiştir. Titan® 7686 katkısının bitüme ilavesiyle elde edilen modifiye bitümün orta sıcaklıklarda belirlenen yorulma dayanımı her ne kadar şartname sınırları içerisinde olsa da katkı oranının artmasıyla yorulma çatlakları oluşumu riskinin artabileceği sonuçlar arasında yer almaktadır.



Şekil 2. Modifiye bitümlerin G\*.sinδ değerlerinin sıcaklıkla değişimi  
(Change of G \* . sinδ values of modified bitumen with temperature)

Tablo 6. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait BBR sonuçları  
(BBR results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bağlayıcı türü	Sünme Sertliği (MPa)		m-Değeri		PG düşük sıcaklık değeri
	-6 °C	-12 °C	-6 °C	-12 °C	
Saf Bitüm	113	233,95	0,4309	0,2962	-16
%4,5 Kraton® D 1101	94,97	171,2	0,3187	0,2651	-16
%3 Titan® 7686	156,27	291,32	0,3009	0,2564	-16
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	115	191,38	0,3163	0,2618	-16
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	119,90	244,28	0,3209	0,2819	-16



Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlerin düşük sıcaklıklardaki performansları BBR testi ile değerlendirilmiştir. Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait BBR test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda şartname gereksinimlerini sağlayan değerler kırmızı ile gösterilmiştir.

Tablo 6'da görüldüğü üzere; -12°C sıcaklıkta bütün bağlayıcıların sünme oranları ve m-değerleri şartname limitlerinin (sünme modülü en fazla 300 MPa, m-değeri en az 0,30) dışına çıkmıştır. Bunun yanı sıra bütün bağlayıcılar -6°C sıcaklıkta şartname gereksinimini sağlamıştır. Dolayısıyla polimer ve hibrit polimer modifikasyon işlemleriyle bitüm numunelerinin düşük sıcaklık performans sınıfları değişmemiştir. SBS ilavesi ile sünme sertliği değeri düşerken plastomer ilavesi ile sünme sertliği değeri artmasına rağmen bütün bağlayıcıların -6°C sıcaklıktaki değerleri şartname limitleri arasında kalmıştır. Tüm sıcaklıklarda, sünme sertliğindeki en büyük değer, %3 oranında Titan® 7686 katkısıyla modifiye edilen bitüm

örneğinde gözlenmiştir. Bu durum; plastomer modifikasyonu ile bitümlerin daha sert bir hal aldıklarını göstermektedir. Dolayısıyla asfalt kaplamalarda düşük sıcaklık davranışını iyileştirmek için polimer ve hibrit polimer modifikasyon işleminin etkisiz olabileceği sonucu çıkmaktadır.

### 3.3. Deneysel Sonuçlarının EN 14023 Modifiye Bitüm Şartnamesi ile Karşılaştırılması

(Comparison of Experiment Results with EN 14023 Modified Bitumen Specification)

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi'nde modifiye bitümlerin değerlendirilmesinde EN 14023 modifiye bitüm standardı kullanılmaktadır. Standartta yer alan şartname limitleri ve elde edilen deneysel sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

SUPERPAVE yönteminde bitümler, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmaktadır. Bu

**Tablo 7.** Deneysel sonuçlarının EN 14023 standardı ile karşılaştırılması (Comparison of test results with EN 14023 standard)

Deneysel Adı	EN 14023 standardı Şartname Limiti	%4,5 Kraton® D 1101	%3 Titan® 7686	%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686
<b>Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde uygulanan deneyler</b>					
Penetrasyon	25-55 mm <sup>-1</sup>	37,5	37,9	36,8	38,5
Yumuşama Noktası	≥ 70°C	70,7	78,2	71,5	73,55
Elastik geri dönme	≥ %60 veya %70	85,3	*	78	*
Parlama Noktası	≥ 220°C	349,5	343,6	345,7	344,9
Özgül ağırlık	1-1,1 g/cm <sup>3</sup>	1,040	1,042	1,039	1,043
Dinamik kayma reometresi @82°C	≥ 1000 Pa	1349,91	1216,38	1142,95	1560,38
Dinamik kayma reometresi @88°C	≥ 1000 Pa	803,056	714,994	695,951	900,126
<b>RTFOT (163°C) ile kısa dönem yaşlandırma sonrası</b>					
Kütle kaybı	≤ 0,5	0,084	0,04	0,108	0,092
Yumuşama noktasındaki artma	≤ 8°C	1,05	1,8	0,85	6
Kalıcı penetrasyon	≥ %40	73,9	80,6	95,5	85,7
Dinamik kayma reometresi @76°C	≥ 2200 Pa	4791,2	3626,77	4623,4	3374,97
Dinamik kayma reometresi @82°C	≥ 2200 Pa	2609,53	1923,09	2514,44	3310,32
Dinamik kayma reometresi @88°C	≥ 2200 Pa	1471,31	1096,73	1400,89	1828,51
<b>PAV ile uzun dönem yaşlandırma sonrası</b>					
Dinamik kayma reometresi @34°C	≤ 5000 kPa	1369	2681	1649	2149
Dinamik kayma reometresi @37°C	≤ 5000 kPa	966,7	1934	1176	1498
Kiriş eğilme reometresi @-6°C	≥ 0,3 ≤ 300 MPa	0,318704 94,97	0,300879 156,27	0,316268 115,00	0,320918 119,90
Kiriş eğilme reometresi @-12°C	≥ 0,3 ≤ 300 MPa	0,265074 171,2	0,256396 291,32	0,261749 191,38	0,281939 244,28

\* %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 numunelerine ait Elastik Geri Dönme yüzdeleri sonuçları test örneklerinin kopmasından dolayı tespit edilememiştir.

nedenle, bu tür bitümlere “Performans Sınıfı (Performance Grade-PG)” bitüm adı verilmiştir [30]. Hibrit polimer katkılarının düşük ve yüksek sıcaklıkta asfalt kaplama performansındaki etkilerinin karşılaştırılması olarak daha net ortaya konulabilmesi için test örneklerine ait alt ve üst PG sınıfları Tablo 8’de sunulmaktadır.

**Tablo 8.** Polimer ve hibrit polimer modifiye bitümlere ait PG sınıfları

(PG results of polymer and hybrid polymer modified bitumen)

Bağlayıcı türü	PG Sınıfı
Saf Bitüm	PG 64-16
%4,5 Kraton® D 1101	PG 82-16
%3 Titan® 7686	PG 76-16
%4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686	PG 82-16
%3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686	PG 82-16

Elde edilen sonuçlar EN 14023 standardı ile karşılaştırıldığında %4,5 Kraton® D 1101, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerinin performans seviyesinin PMB 82-16 olduğu, %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün performans seviyesinin ise PMB 76-16 olduğu belirlenmiştir. Tablo 7’de kırmızı ile işaretlenen değerler şartname limitlerinin sağlanmadığı deney parametrelerini göstermektedir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların deney sonuçları incelendiğinde bütün modifiye bitümler penetrasyon, yumuşama noktası ve 82°C sıcaklıkta  $G^*/\sin\delta$  şartname gereksinimlerini sağlamıştır. Bağlayıcıların hepsi 82°C sıcaklıkta  $G^*/\sin\delta$  şartını sağlamasına rağmen 88°C sıcaklıkta hiçbirisi bu şartı sağlayamamıştır. RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları incelendiğinde %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün 76°C sıcaklıkta  $G^*/\sin\delta$  şartname kriterlerini sağladığı fakat 82°C sıcaklıkta sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle %3 Titan® 7686 modifiyeli bitümün performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PMB 76-Y olarak belirlenmiştir. Diğer bütün modifiye bitümler 82°C’de RTFOT sonrası  $G^*/\sin\delta$  şartını sağladıklarından %4,5 Kraton® D 1101, %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerinin performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin PMB 82-Y olduğu belirlenmiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların elastik geri dönme deneylerinde %3 Titan® 7686 ve %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümlerde kopma meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu bağlayıcıların düşük sıcaklıkta elastik davranışı azalmıştır. Fakat bu deney şartı sadece elastomer polimerlerle modifiye bitümlerde aranmaktadır. Dolayısıyla plastomerler için geçerli olmadığından şartname açısından herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Fakat %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 modifiye bitümde hem elastomer hem de plastomer katkı bulunduğundan bu bağlayıcı açısından olumsuzluk söz konusudur. RTFOT sonrası bütün modifiye bitümlerin kütle kaybı, kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası farkı şartname gereksinimlerini sağlamıştır. PAV ile yaşlandırma sonrası bütün modifiye bitümler -6°C sıcaklıkta BBR deneylerinden elde edilen sünme modülü ve m-değeri gereksinimlerini sağlamıştır. Ayrıca bağlayıcıların hiç biri -12°C sıcaklıkta BBR şartname

gereksinimlerini sağlayamamıştır. Bütün bağlayıcılar PAV kalıntılarına uygulanan DSR deneylerinden elde edilen  $G^*/\sin\delta$  şartname gereksinimlerini sağlamıştır. Dolayısıyla bütün bağlayıcıların performans seviyesi düşük sıcaklık değerinin PMB X-16 olduğu tespit edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Son yıllarda artan trafik hacmi ve araç sayısı ile beraber asfalt kaplamaların maruz kaldıkları yük miktarı günden güne artmakta ve kaplamanın hizmet ömrü kısalmaktadır. Yol kaplamalarını, ağır trafik koşulları ve tekrarlı yükler altında viskoelastik davranışlarında meydana gelen bozulmalardan dolayı yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlar, düşük sıcaklıklarda ise gevrek yapı oluşumu tehdit etmektedir.

Asfalt kaplamaların yüksek maliyetleri araştırmacıları asfalt stabilitesini ve dayanıklılığını arttıracak çözümler aramaya motive etmektedir. Dolayısıyla inşaat endüstrisinde bu amaçlarla kullanılan polimer katkıları stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmanın asıl amacı elastomer, plastomer ve hibrit elastomer-plastomer kombinasyonunun bitümün reolojik özelliklerine etkilerinin araştırılmasıdır. Test sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

Elastomer, plastomer ve hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri bir arada değerlendirildiğinde; plastomer katkı ilavesi asfalt kaplamaların sıcaklığa karşı duyarlılığını etkili biçimde düşürdüğü sonuçlar arasında yer almaktadır. Hibrit polimerler ile modifiye edilen bitüm numuneleri kendi içinde kıyaslandığında en yüksek plastomer oranına sahip olan %3,5 Kraton® D 1101 + %1 Titan® 7686 örneğinin sıcaklığa karşı duyarlılığının en az olduğu belirlenmiştir.

Test örneklerinin elastik geri dönme yüzdeleri bir arada değerlendirildiğinde, elastomer katkı ilavesiyle bitüm örneklerinin esneklik davranışı artmıştır. Hibrit polimerlerin kullanımı açısından %4 Kraton® D 1101 + %0,5 Titan® 7686 hibrit polimer modifiyeli bitüm ile üretilen asfalt kaplamalarının sadece plastomer içeren modifiye bitümlere göre belli zaman içinde elastikiyet bakımından bir avantaj sağlayacağı yorumlanabilmektedir.

Yüksek sıcaklıkta dinamik kayma reometresi sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, elastomer ve plastomer katkı ilavesiyle bitümlerinin performans seviyesi yüksek sıcaklık değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Performans sınıfındaki bu artış, bitüm modifikasyonunda polimer katkıların ve hibrit polimer kombinasyonunun kullanımının tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağladığını göstermektedir.

Orta sıcaklık performansını belirlemek amacıyla uygulanan dinamik kayma reometresi testi sonuçları irdelendiğinde, plastomer katkısı kullanılan asfalt kaplamaların yorulma çatlaklarına karşı daha riskli oldukları tespit edilmiştir. Düşük sıcaklık performansını belirlemek amacıyla uzun dönem yaşlandırılmış modifiye bitüm örnekleri üzerine uygulanan BBR testi sonuçlarına göre polimer ve hibrit

polimer modifikasyon işleminin bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini değiştirmedeği belirlenmiştir.

Çalışma sonuçları; daha yüksek rijitlik ve elastik davranış için modifiye katkı malzemelerinin birlikte kullanılabilirliklerini göstermektedir. Çalışma kapsamında iki farklı ticari ürün kullanılarak modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlar özellikle atık polimerlerle birlikte ticari ürünlerin bitüm modifikasyonunda hibrit kullanılarak çevresel ve ekonomik fayda sağlanabileceği fikrini desteklemektedir. Mevcut deney sonuçlarının geçerlilik kazanması adına karışım numuneleri hazırlanarak özellikle tekerlek izi ve yorulma deneylerinin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. İleriki çalışmalara ışık tutmak amacıyla; farklı penetrasyon sınıflarına ait bitümlerde, hibrit polimer modifikasyonu kullanımına ait maliyet azalmasına yönelik performans analizlerinin yapılması önerilmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gonzalez O., Munoz M.E., Santamaria A., Garcia M.G Navarro F.J., Partal P., Rheology and stability of Bitumen/EVA blends, *European Polymer Journal*, 40, 2365-2372, 2004.
- Rahman M.N., Ahmeduzzaman M., Sobhan M.A., Ahmed T.U., Performance evaluation of waste polyethylene and PVC on hot asphalt mixtures, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1 (5), 97-102, 2013.
- Mohammadiroudbari M., Tavakoli A., Aghjeh M.K.R., Rahi M., Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 116, 245-251, 2016.
- Formela K., Sulkowski M., Saeb M.R., Colom X., Haponiuk J.T., Assessment of microstructure, physical and thermal properties of bitumen modified with LDPE/GTR/elastomer ternary blends, *Construction and Building Materials*, 106, 160-167, 2016.
- Daryae D., Ameri M., Mansourkhaki A., Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures, *Construction and Building Materials*, 235, 1-11, 2020.
- Schaur A., Unterberger S., Lackner R., Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen, *European Polymer Journal*, 96, 256-265, 2017.
- Ragni D., Ferrotti G., Lu X., Canestrari F., Effect of temperature and chemical additives on the short-term ageing of polymer modified bitumen for WMA, *Materials & Design*, 160, 514-526, 2018.
- Yusoff N.I.Md., Alhamali D.I., Ibrahim A.N.H. Hassan N.A., Engineering characteristics of nanosilica/polymer modified bitumen and predicting their rheological properties using multilayer perceptron neural network model, *Construction and Building Materials*, 204, 781-799, 2019.
- Rajan S., Sutton M.A., Oseli A., Emri I., Matta F., Linear viscoelastic creep compliance and retardation spectra of bitumen impregnated fiberglass mat and polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 155, 664-679, 2017.
- Gonzalez E., Costa L.M.B., Silva H.M.R.D., Hilliou L., Rheological characterization of EVA and HDPE polymer modified bitumen under large deformation at 20°C, *Construction and Building Materials*, 112, 756-764, 2016.
- Ghoreishi A., Koosha M., Nasirizadeh N., Modification of bitumen by EPDM blended with hybrid nanoparticles: Physical, thermal, and rheological properties, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-14, 2018.
- Ezzat E. Abed A.H., Enhancement rheological properties of asphalt binder modified with hybrid polymers according to superpave system, *Materials Today: Proceedings*, Article in press, 2020.
- Lecomte M. Hacker S. Teymourpour P. Bahia H., Use of plastomeric additives to improve mechanical performance of warm mix asphalt, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague-Czech, Republic, 1-3 June, 2016.
- Yan K., Tian S., Chen J., Liu J., High temperature rheological properties of APAO and EVA compound modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 233, 1-11, 2020.
- Selvavathi V., Sekar V.A., Sriram V., Sairam B., Modifications of bitumen by elastomer and reactive polymer - A comparative study, *Petroleum Science and Technology*, 20 (5-6), 535-547, 2007.
- Mandrawalia A.K., Gaur A., Mittal A., Laboratory study on SBS modified bitumen with Titan copolymer, *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1, 3, 5-8, 2017.
- Öcal A., Gürü M., Karacasu M., Improvement of bitumen performance properties with nano magnesium spinel and colemanite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 939-951, 2018.
- Kok B.V., Yılmaz M., Akpolat M., Effect of CR and FT-paraffin versus SBS modification in terms of conventional and rheological properties, *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (12), 1052-1059, 2017.
- Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Farshbafian F.K., Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1409-1419, 2020.
- KRATON. Polimer. <https://kraton.com/products/pdsDocs/polymer/D1101K.pdf>. Yayın tarihi Ocak 9, 2018. Erişim tarihi Şubat 20, 2020.
- Öner J., Farklı vaks türleri ile üretilen bitümlerin reolojik özelliklerinin asfalt betonu performansı üzerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2016.

22. Lav A. H., Lav M. A., Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, 3, 334, 2004.
23. Oruç Ş., Yılmaz B., Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive, *Construction and Building Materials*, 123, 207-213, 2016.
24. Oruç Ş., Yılmaz B., Sancak K., Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder, *Road Materials and Pavement Design*, 17 (4), 810-824, 2016.
25. Lu X., Uhlback P., Soenen H., Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4mm parallel plates, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10 (1), 15-23, 2016.
26. Mehra S., Mittal A., Sharma P N., Laboratory study on CRMB modified bitumen mixes with Titan polymer. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1 (3), 5-8, 2014.
27. Zhu J. Birgisson B. Kringos N., Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *European Polymer Journal*, 54 (1), 18-38, 2014.
28. Garilli E., Autelitano F., Giuliani F., Use of bending beam rheometer test for rheological analysis of asphalt emulsion-cement mastics in cold in-place recycling, *Construction and Building Materials*, 222, 484-492, 2019.
29. Zhou J., Chen X., Xu G., Fu Q., Evaluation of low temperature performance for SBS/CR compound modified asphalt binders based on fractional viscoelastic model, *Construction and Building Materials*, 214, 326-336, 2019.
30. Sağlık A., Öztürk E.A., Determination of the performance-grades of surface treatment binders in turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 689-698, 2014.