



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi

ISSN: 2667-8764 , 3(1), 1-20, 2021

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>






Araştırma Makalesi / *Research Article*

Doi: [10.47898/ijeased.826956](https://doi.org/10.47898/ijeased.826956)

Etilen Vinil Asetat (EVA) Polimer Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Araştırılması

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH ^{1*}, Perviz AHMEDZADE ¹, Taylan GÜNAY ¹

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35100, Türkiye.

Yazar Kimliği / <i>Author ID (ORCID Number)</i>	Makale Süreci / <i>Article Process</i>
*Sorumlu Yazar / <i>Corresponding author</i> : sajjad.hassanpour.kasanagh@mail.ege.edu.tr  https://orcid.org/0000-0001-9484-4324 , S.H. Kasanagh  https://orcid.org/0000-0001-8348-5901 , P. Ahmedzade  https://orcid.org/0000-0002-2669-6320 , T. Günay	Geliş Tarihi / <i>Received Date</i> : 17.11.2020 Revizyon Tarihi / <i>Revision Date</i> : 14.12.2020 Kabul Tarihi / <i>Accepted Date</i> : 20.12.2020 Yayın Tarihi / <i>Published Date</i> : 15.07.2021

Alıntı / *Cite* : Hassanpour Kasanagh, S., Ahmedzade, P., Günay, T. (2021). Etilen Vinil Asetat (EVA) Polimer Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Araştırılması, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 3(1), 1-20.

Özet

Bu çalışmada, Etilen Vinil Asetat (EVA) polimer katkısının bitümün fiziksel ve yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırma kapsamında geleneksel bitüm deneyleri ile birlikte dönel viskozite deneyleri gerçekleştirilmiş ayrıca bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını belirleyen reolojik çalışmalar dinamik kayma reometresi (DSR) ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyleri yardımıyla uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, EVA polimeri saf bitümün penetrasyonu düşürdüğü, yumuşama noktası ve viskozitesini ise arttırdığı tespit edilmiş bu sayede bitümün fiziksel olarak sertleşmesine neden olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, çalışma kapsamında DSR yüksek sıcaklık performans sınıfı (PG) 76 °C olarak tespit edilen %7 EVA katkılı bağlayıcının MSCR deneyine göre performans sınıfı PG70S olarak belirlenmiş ve PG64S olan saf bitüme göre bir sınıf artış sağlandığı belirlenmiştir. Bu sonuç, EVA katkılı bitümün 70°C sıcaklıkta, 70 km/s üzeri araç hızında ve yirmi yıl boyunca trafik tasarım şeridinde beklenen maksimum 10 milyon (eşdeğer standard dingil yükü) ESAL sayısında kalıcı deformasyona maruz kalmadan kullanılabileceğini ifade etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Etilen Vinil Asetat (EVA), Polimer, Viskozite, Performans Sınıfı, DSR, MSCR.

An Investigation on Physical and Rheological properties of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Polymer Modified Bitumen

Abstract

The effects of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) on physical and high temperature performance of bitumen was investigated in this work. conventional bitumen tests, rotational viscosity tests were conducted within the context of the research, and rheological studies such as dynamic shear rheometer (DSR), multiple stress creep recovery tests (MSCR) were also performed to determine high temperature performance of binders. The results indicated that EVA polymers reduce penetration, increase the softening point and viscosity of the bitumen which in turn indicates bitumen became stiffer after the modification. Besides, %7 EVA modified binder classified as PG 76 in DSR test was graded in MSCR grading system as PG70S which is one level higher compared to that of base bitumen. This result means that EVA modified binders can be used without permanent deformation until 70°C, under 10 million ESAL at 70 km/h traffic speed.

Keywords: *Bitumen, Ethylene-Vinyl Acetate (EVA), Polymer, Viscosity, Performance Grade, DSR, MSCR.*

1. Giriş

Bitümlü malzemeler esnek kaplamaların inşasında bağlayıcı malzeme olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Behnood, 2020; Behnood ve Olek, 2017). Türkiye’de de en yaygın karayolu inşaa yöntemi bitümlü sıcak karışımların (BSK) da dahil olduğu esnek kaplama türüdür. Trafik hacmindeki hızlı artış, yük taşımacılığı yapan araçların fazlalığı ve iklim değişiklikleri, asfalt bağlayıcı performansında bazı azalmalar meydana getirmekte, bu da BSK’larda tekerlek izi (kalıcı deformasyon) gibi bozulmaların yolun ekonomik ömründen daha erken meydana gelmesine neden olmaktadır. Viskoelastik bir malzeme olan bitüm esnek kaplamanın performansında önemli derece de rol almaktadır (Fernandes ve ark., 2008). Edinildiği rafineriye göre farklı içeriklere sahip olabilen bitüm üzerinde uygulanan rafine işlemleri, bitüm kimyası ve reolojisinde ayrıca karmaşıklıklara yol açabilir. Dolayısıyla, bitümün reolojik davranışı da yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak tamamen viskozdan elastığe değişim gösterebilmektedir. BSK’nın kaplama çatlamasını önlemek için düşük servis sıcaklıklarında yeterince esnek olması ve yüksek servis sıcaklığında tekerlek izini önlemek için gerekli miktarda sert (elastik katı) yapıda olması gerekmektedir (Köfteci ve ark., 2020).

Esnek kaplamalar ağır trafik ve yüklemelere maruz kaldığında beklendiği gibi performans göstermediği için bitümün karışım içerisindeki performansını artırılması amacıyla çeşitli modifikasyon malzemeleri kullanılmaktadır.

Araştırmalar, bitüme ve BSK’lara bazı polimerlerin dahil edilmesiyle kaplama performanslarını arttırabileceğini ortaya koymuştur. Polimer katkısı ile modifiye edilmiş bitüm,

bağlayıcının kimyasal yapısını değiştirmeden fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştirebilmektedir. Polimerler genellikle bitümlü bağlayıcı içerisinde erime yoluyla ağımsı yapıda bir matris oluştururlar (Kaya ve ark., 2019). Bu uzun zincirli moleküllerin oluşturduğu matris bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini değiştirebilmektedir. Polimer katkı maddeleri elastikiyeti arttırarak, bağlayıcının kırılma hale geçtiği (katı faz) mertebeyi düşürerek ve/veya bitümün yumuşama noktasını yüksek sıcaklıklara taşıyarak bağlayıcının özelliklerini iyileştirebilirler. Bu da kullanıldıkları karışımların daha yüksek sıcaklıkta daha fazla sertliğe sahip olmasını ve oluşan kalıcı deformasyonların azaltılmasını sağlamaktadır.

Bitümün modifikasyonunda kullanılan polimerler, plastomerler ve elastomerler olarak bilinen iki geniş kategoriye ayrılmaktadır (Ahmadinia ve ark., 2011; Airey, 2002, 2004; Al-Hadidy ve Yi-Qiu, 2009). Yarı kristal kopolimer olan etilen vinil asetat (EVA), hem karışım sırasında BSK'nın işlenebilirliğini hem de hizmette deformasyon direncini arttırmak için bitüm içerisinde kullanılan başlıca plastomerlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Haddadi ve ark., 2008; Sengoz ve Isikyakar, 2008; Stastna ve ark., 2003).

Liretatürlerdeki çalışmalarda, düşük miktarda kullanılan EVA katkı maddesi ilavesinin bitümün reolojik davranışını önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir (Stastna ve ark., 2003). Bu sonuç, diğer polimer katkıları üzerinde yapılmış olan çalışmalar (stiren-butadien-stiren (SBS) ve poliolefinler (polypropylene, polyetilene) gibi kopolimerler ve hatta diğer EVA katkılı bitümlerin dahil olduğu çalışmalar) ile uyumsuzluk göstermektedir (Ameri ve ark., 2012; García-Morales ve ark., 2004; Polacco ve ark., 2004).

Bu çalışmanın amacı EVA katkısının daha geniş miktarlarda (yüzde 3-7 aralığında) kullanılmasıyla Türkiye kaynaklı B50/70 bitüm üzerindeki etkisi ve bunun yanı sıra daha önceki çalışmalardan daha kapsamlı fiziksel (penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre) ve reolojik deneyler gerçekleştirerek EVA plastomerinin yüksek sıcaklıktaki performans sınıfını belirlenmesidir. Reolojik deneylerde performans sınıfı belirlemenin yanı sıra farklı yüklemelere göre trafik sayısı ve hızını da göz önünde bulundurarak farklı kategorilere ayıran çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi üzerinde EVA katkılı bitümün kalıcı deformasyon direnci incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışmada Türkiye'nin TÜPRAŞ A.Ş. rafinerisinden elde edilen 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Modifikasyon için kullanılan polimer katkı DuPont firması tarafından üretilen Elvax®420, ağırlıkça %18 vinil asetat komonomer içeriğine sahip bir EVA kopolimerdir. Şeffaf renkli ve granül şeklinde olan katkının yumuşama noktası 53 °C'dir. ISO 1183 standardına göre özgül ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen EVA katkısının görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. EVA polimer katkısı.

2.1.1. Modifikasyon İşlemi

EVA katkısı B50/70 penetrasyona sahip bitüme %3, %4, %5, %6 ve %7 oranlarında eklenerek EVA modifiyeli bitümlü bağlayıcılar hazırlanmıştır. Modifiye bitümlerin karıştırma işlemlerinde yüksek devirli ve bitüm modifikasyonu için tasarlanan başlığa sahip Silverson L5M markalı mikser kullanılmıştır. Karıştırma sırasında kesme kuvveti sağlayan yüksek devirli karıştırıcı sayesinde katkıların bitüm içerisinde iyi bir dağılım göstermeleri maksadıyla 60 dakika boyunca 3000 devir/dk hız ile 180°C sıcaklıkta karıştırılmış ve modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir (Hassanpour Kasanagh, 2020). Modifiye sırasında kullanılan Silverson L5M markalı mikser cihazı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Etilen vinil asetat (EVA) polimer katkısı.

Orijinal ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırma işlemleri ASTM D2872 şartnamesine göre ince dönel ince film etüvü (RTFO) deneyi ile gerçekleştirilir. Bağlayıcılar, etüvde 163°C’de 75 dakika yaşlandırılmış ve her şişe yaklaşık 35 gram bağlayıcıyla doldurulmuştur (ASTM D2872, 2012). İçinde 8 adet silindir şeklindeki cam numune şişelerinin yatay şekilde yerleştirildiği RTFO cihazının iç görünümü Şekil 3’te verilmiştir.



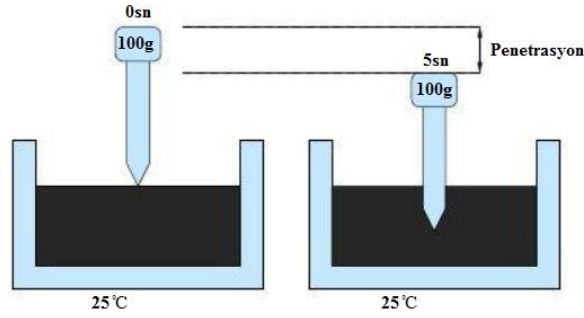
Şekil 3. RTFO cihazının iç görünümü.

RTFO deneyiyle kısa süreli yaşlandırma işlemleri yapılan bitümlü bağlayıcılar, dinamik kayma reometresi (DSR) ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneylerinde kullanılmak üzere kapalı şekilde saklanmıştır.

2.2. Fiziksel Deneyler

2.2.1. Penetrasyon

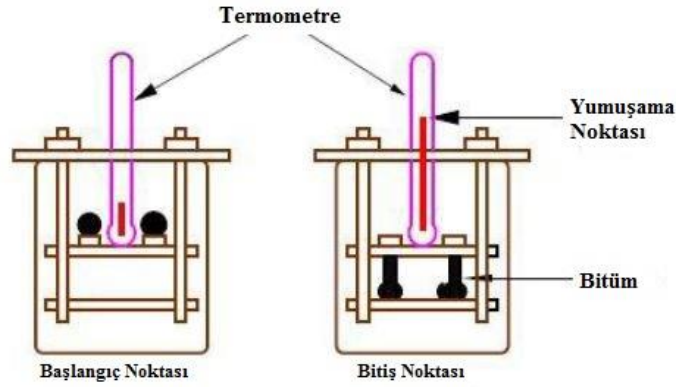
Penetrasyon deneyi bitümün kıvamını belirlemektedir. ASTM D5/D5M Standardı çerçevesinde bitümlü bağlayıcıların üzerinde penetrasyon deneyi yapılmaktadır (ASTM D2872, 2012). Penetrasyon, standart bir iğnenin belirtilen sıcaklık, yük ve yükleme süresi koşulları altında bir bitüm numunesinin içine dikey olarak nüfuz edeceği miktar olarak ifade edilmektedir. Birimi milimetrenin onda biridir ($1 \text{ dmm} = 0,1 \text{ mm}$). Penetrasyon deneyinde uygulanan yük 100 g, yükleme süresi 5 sn ve deney sıcaklığı 25°C 'dir. Her deney için, deney sıcaklığında belirtilen şartlandırmadan sonra, üç ayrı penetrasyon ölçümü alınır. Üç değer ortalaması en yakın tam sayı olarak kaydedilmektedir. Üç ölçüm arasındaki farkın standartta belirlenmiş sınırı aşmaması beklenir. Penetrasyon deneyinin yapılışı Şekil 4'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4. Penetrasyon deneyinin işleyişi.

2.2.2. Yumuşama Noktası

Bitümün yumuşama derecesine ulaştığı akıcı sıvı hale geldiği sıcaklık bitümün yumuşama noktası olarak ifade edilmektedir. Deney, standart yüzük ve bilye aparatı kullanılarak ASTM D36 şartnamesinin prosedürüne uygun şekilde gerçekleştirilir (ASTM D36/D36M, 2014). Buna göre, akıcı haldeyken yumuşama noktası yüzüğüne dökülen bitüm numunesinin üzerine küçük bir çelik bilye yerleştirilir ve ardından bir beher içerisinde 5°C 'lik su banyosuna konur. Banyo sıcaklığı dakikada 5°C yükseltilir ve bitümü yumuşatır ve sonunda bilye halkanın içerisinde yavaşça geçerek bitüm deforme olur. Her iki numune üzerinde yumuşatılmış bitüm, aşağıda 25 mm mesafedeki metal plakaya temas ettiği andaki sıcaklık not edilir ve iki sıcaklığın ortalaması yumuşama noktası olarak kaydedilir. Genel olarak, yüksek yumuşama noktası düşük sıcaklık duyarlılığının göstergesidir ve bu özellikte bitümler sıcak iklimlerde tercih edilmektedir. Şekil 5, yumuşama noktası deney kurulumunu göstermektedir.



Şekil 5. Yumuşama noktası deneyinin işleyişi.

2.2.3. Penetrasyon İndeksi

Penetrasyon indeksi (PI) değeri, bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirlenmesi amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri yardımıyla denklem (1)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. PI değeri azaldıkça bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığı artmaktadır. Sıcaklığa hassasiyeti normal olan bir bitümün PI değeri -2 ile +2 arasında olması önerilmektedir. PI değerinin -2'den küçük olması bitümün sıcaklığa duyarlılığının artması ve +2'den büyük olması bitümün okside olması anlamına gelmektedir (Hunter ve ark., 2015).

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

Burada, Pen_{25} bitümlü bağlayıcıların 25 °C'deki penetrasyon değeri ve YN ise yumuşama noktası sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.

2.2.4. Dönel Viskozite

Dönel viskozite (RV), bitümün hazırlama işlemleri sırasında işlenebilirliğini ve pompalanabilirliğini değerlendirerek reolojik özelliklerini belirlemektedir. Çalışmada kullanılan Brookfield dönel viskozimetre cihazı ve RV aletine bağlı olan sıcaklık kontrol sistemi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Brookfield dönel viskozimetre cihazı.

RV deneyi yaşlandırılmamış bitümler üzerinde yapılmaktadır. Viskozite değeri, RV cihazına ait silindirik ucun belirlenen sıcaklıkta (135°C ve 165°C), dönüş hızı (20 devir/dk) sabit tutularak gerçekleştirilmektedir. ASTM D 4402 standardında ayrıntılı şekilde açıklandığı gibi, 135°C 'de viskozite deneyi yapıldığında, viskozite değerinin maksimum sınırı 3 Pa.s (3000 cP) olması gerekmektedir (ASTM D4402, 2015). Ayrıca, dönel viskozimetre BSK'ların karıştırma ve sıkıştırma sırasında sıcaklık aralıklarını belirlemek için kullanılmaktadır. 165°C ve 135°C 'de viskozite deneyi yapıldıktan sonra, BSK'ların tasarımında kullanılacak ideal sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları logaritmik viskozite-sıcaklık grafiklerinden belirlenir (Almusawi ve ark., 2020). Superpave şartnamesine göre, karıştırma sıcaklıkları için 0.17 ± 0.02 Pa.s ve sıkıştırma sıcaklıkları için 0.28 ± 0.02 Pa.s arasındaki viskozite aralığı hesaplanarak ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı elde edilmektedir.

2.3. Reolojik Deneyler

2.3.1. Dinamik Kayma Reometresi (DSR)

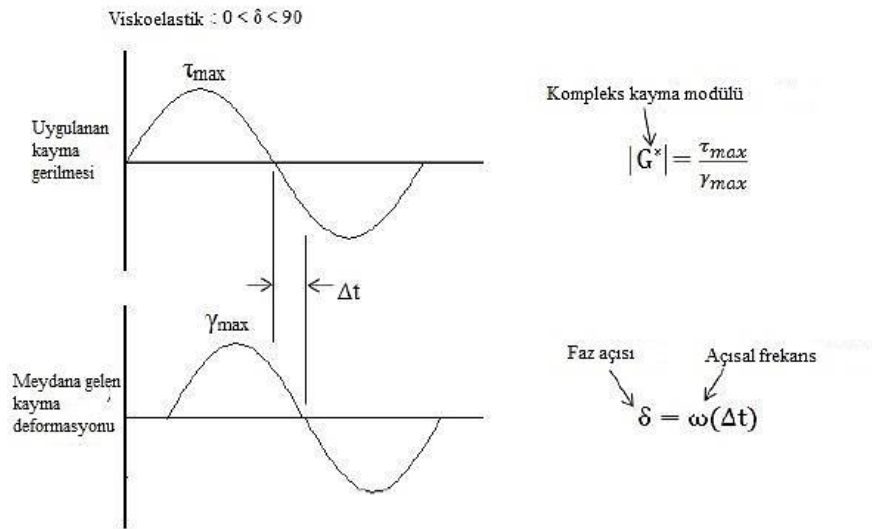
Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi 10 rad/s (1.6 Hz) frekansında bitümün yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyona karşı direncini incelenmesi için yüksek sıcaklıklarda ($52-82^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmiştir. DSR deneyinin ayrıntılı yapılış şekli AASHTO T 315 "Asfalt Bağlayıcının Dinamik Kesme Reometresini Kullanarak Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi" standardında tanımlanmıştır (AASHTO T315, 2012). Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını incelenmesi sırasında, 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığında hazırlanmış bağlayıcılar üzerinde

deney uygulanmaktadır. Çalışmada kullanılan Anton Paar Smart Pave Plus 301 DSR cihazı Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Dinamik kayma reometre cihazının.

Deneyin sonucunda kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) parametreleri elde edilmektedir. Kompleks kayma modülü, bitümün kayma gerilmesi neticesinde deformasyona göstermiş olduğu direnç ve faz açısı ise viskoz ve elastik deformasyon tepkilerinin birbirlerine olan oranı şeklinde ifade edilebilir. DSR cihazında G^* ve δ parametreleri hesaplanarak, bağlayıcıların visko-elastik davranışı Şekil 8’de verilmiştir (McGennis ve ark., 1995). Superpave şartnamesinde, $G^*/\sin\delta$ değeri bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performans ölçütü olarak tanımlanmış ve tekerlek izi (kalıcı deformasyon) parametresi olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 8. kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) parametrelerinin hesaplanması.

Yüksek sıcaklık performans sınıfı (PG) belirlenmesi için, $G^*/\sin\delta$ parametresinin miktarı deneyin uygulandığı sıcaklıkta yaşlanmamış bağlayıcılar için minimum 1 kPa ve kısa süreli yaşlandırılmış (RTFO) bağlayıcılar için minimum 2.2 kPa olması istenmektedir.

2.3.1. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR)

Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi AASHTO T350 şartnamesine göre kısa süreli yaşlandırılmış (RTFO) bağlayıcılar üzerinde yüksek sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Deneyin amacı bitümü farklı yüklemelere ve gerilmelere maruz tutarak tekerlek izine karşı direncini ölçmektir. Numuneler ilk olarak 0,1 kPa ve ardından 3,2 kPa olarak iki farklı kayma gerilmesine tabi tutulmaktadır. Birbirinden bağımsız olarak numunelere uygulanan bu iki aşamalı kayma gerilmeleri 1 saniye yükleme ve 9 saniye dinlenme şeklinde 10 döngüden oluşmaktadır.

AASHTO M 332 şartnamesine göre, MSCR deneyinde geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) ve elastik geri dönme (R) olmak üzere iki ana parametre bitümün sınıflandırılmasında kullanılmaktadır (AASHTO M332, 2014). Döngü sırasındaki deformasyon analizi, elastik deformasyon (geri kazanılabilir) ve kalıcı deformasyon (geri kazanılamaz) özellikleri olarak ayrılmaktadır. Aşağıda verilen Denklem (2)-(5), R ve J_{nr} değerlerini hesaplamaktadır (Król ve ark., 2015).

$$R = \frac{\sum_{1}^{10} \epsilon_t(\tau, N)}{10} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{10}}{\epsilon_1} \times 100 \quad (3)$$

$$J_{nr} = \frac{\sum_{1}^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10} \quad (4)$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \epsilon_{10} / \tau \quad (5)$$

Bu formüllerde aşağıdaki semboller kullanılmaktadır:

τ : gerilme, N : döngü sayısı, $\epsilon_1 = 1$. saniyenin sonunda meydana gelen deformasyon miktarı (yükleme süresinin sonunda), $\epsilon_{10} = 10$. saniyenin sonunda meydana gelen deformasyon miktarı (geri kazanma süresinin sonunda).

AASHTO M 332, çevresel (iklim) faktörlere ve tasarım trafik hacimlerine dayanarak bitüm sınıfları ve şartname sınırlarını belirlemiştir. Buna göre, çevresel faktörler PG 64, PG 70 vb. gibi yüksek sıcaklık performans sınıfları ve tasarım trafik hacimleri ise standart, ağır, çok ağır ve aşırı ağır gibi kategorilerle ifade edilmektedir. Çeşitli sınıflar için hız ve eşdeğer dingil yükü (ESAL) değerleri Tablo 1’de verilmiştir (AASHTO M332, 2014). Şartnamenin ana amacı, yetersiz kalmış klasik DSR PG sisteminin yerine trafiği de dahil ederek daha detaylı bir yaklaşım ortaya koymaktır.

Tablo 1. MSCR deneyinde trafik hızı ve seviyesine göre bitüm seçimi.

ESALs ^a (Milyon)	Trafik Akımı (traffic load rate)		
	Durgun ^b	Ağır ^c	Standart ^d
< 0,3	V	H	S
0,3 - <3	V	H	S
3 - <10	V	H	S
10 - <30	V	H	H
≥ 30	E	V	V

^a20 yıl boyunca trafik dizayn şeridinde beklenen ESALs.
Ortalama trafik hızı ^b(< 20 km/s), ^c(20 ile 70 km/s arası), ^d(> 70 km/s).
S:Standart (J_{nr}=2-4,5), H: Ağır (J_{nr}=1-2), V: Çok Ağır (J_{nr}=0,5-1), E:Aşırı Ağır (J_{nr}=0-0,5)

3. Bulgular ve Tartışma

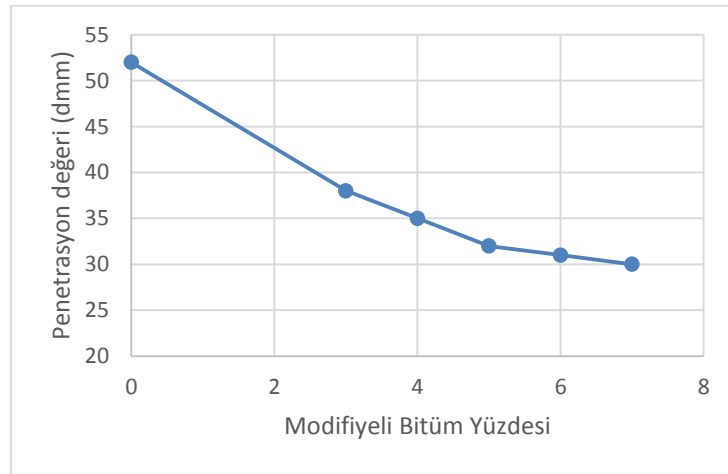
3.1. EVA Modifiyeli Bağlayıcıların Fiziksel Performansı

Çalışmada, EVA polimerinin 50/70 penetrosyon sınıfına sahip bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkisi fiziksel deneyler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Fiziksel deneyler penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi olmak üzere ve bu iki deneyin sonuçlarını kullanarak elde edilen PI değerini ve dönel vizkozite (RV) deneyini kapsamaktadır. Penetrasyon deneyi bitümün sertliğini ve kıvamını ölçmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün yumuşama derecesine ulaştığı sıcaklık yumuşama noktası olarak ifade edilmektedir. PI değeri ise bitümün sıcaklığa duyarlılığının göstergesi olarak tanımlanmaktadır.

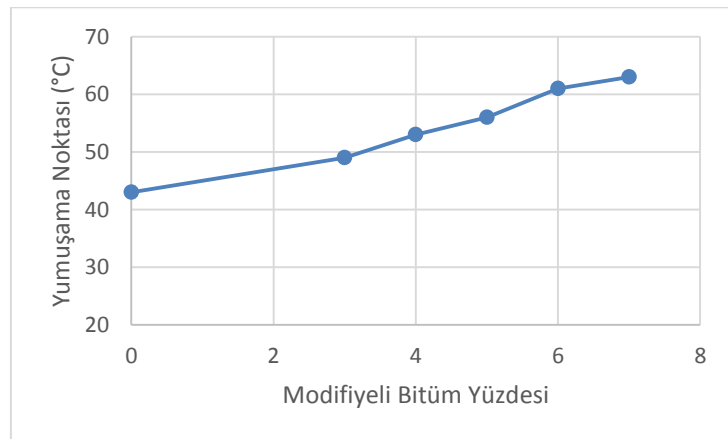
EVA katkılı bitümlere uygulanan fiziksel deneylere ait sonuçlar Şekil 9-12 ve Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde, EVA katkısı saf bitümlü bağlayıcıların penetrasyonunu düşürmüş ve aynı zamanda yumuşama noktası ve PI değerinin artmasını sağlamıştır. EVA modifiyeli bağlayıcılarda katkı yüzdesi arttıkça yumuşama noktasının arttığı ve maksimum yumuşama noktası değerine %7 EVA katkılı bağlayıcının sahip olduğu görülmüştür (63°C). Böylece en yüksek yumuşama noktasına ve en düşük penetrasyon değerine en yüksek modifikasyon seviyesinde ulaşılmıştır. Bu sonuç, modifikasyon seviyesinin arttıkça bağlayıcının

sertleşmesini ve dolayısıyla tekerlek izi gibi bozulmaların meydana gelme durumunu önleyebilme kapasitesini ortaya koymaktadır.

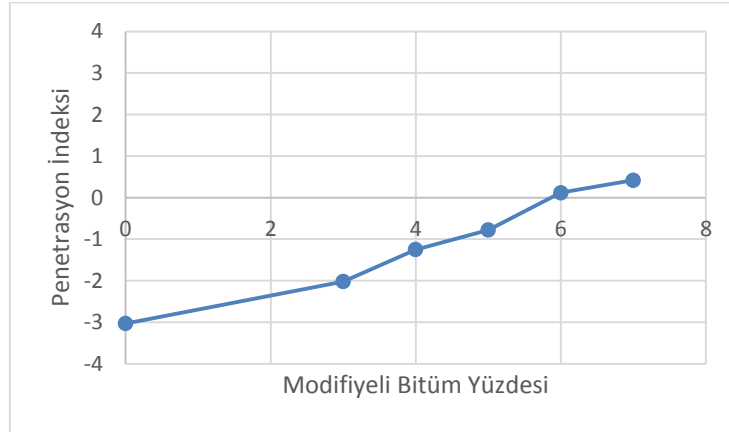
Şekil 11’de PI değerlerine bakıldığında, orijinal bağlayıcının -3,03 olan PI değeri bu bağlayıcının ısıya olan yüksek duyarlılığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, polimer katkılarının ilavesiyle sıcaklığa olan hassasiyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm modifikasyon seviyelerinde (%3-%7) PI değerinin standart sınırı olan $(-2 < PI < +2)$ değerlerini sağlamış ve en yüksek modifikasyon seviyesinde ise PI değeri +0.42 olarak hesaplanmıştır. PI değerinin -2’den az olması, bitümün ısıya daha duyarlı olduğunu ve +2’den fazla olması ise bitümün okside olduğu anlamına gelmektedir (Hunter ve ark., 2015).



Şekil 9. Orijinal ve modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları.



Şekil 10. Orijinal ve modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları.



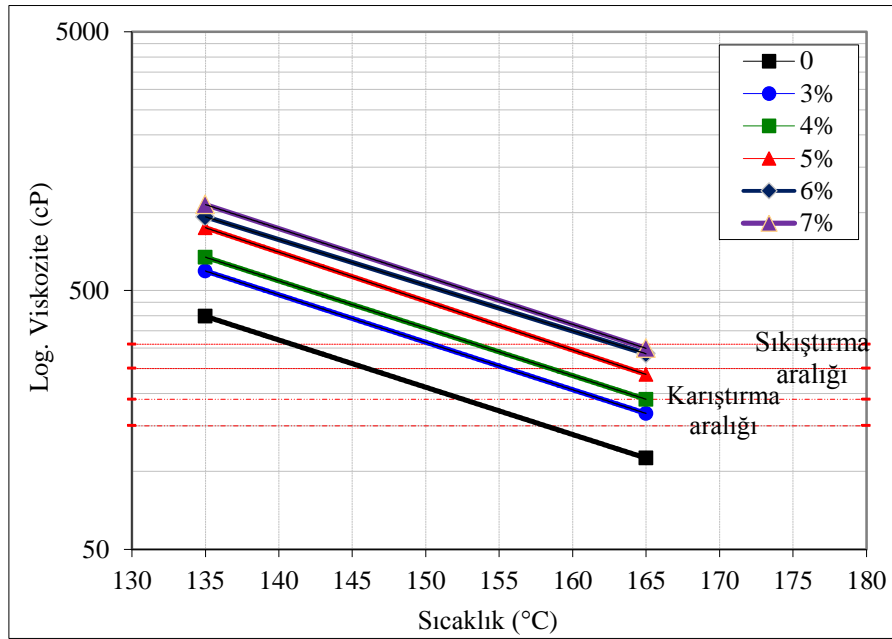
Şekil 11. Orijinal ve modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon indeksi sonuçları.

EVA katkılı bağlayıcılara ait viskozite değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Saf bitümlü bağlayıcıya artan miktarlarda (%3, %4, %5, %6 ve %7) EVA polimer katkısının ilavesi sonucunda bitümün viskozite değerinin sürekli olarak arttığı tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının 135°C’deki viskozite değeri 398 cP iken, EVA katkısının en düşük oranda kullanımında (%3), viskozite değeri 595 cP olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, %3 katkılı bağlayıcıya göre 1,50 kat artışı ifade etmektedir. 165°C’deki viskozite değerlerinde de 135°C’de olduğu gibi numuneler arasında aynı artış sırası tespit edilmiştir.

Ayrıca, dönel viskozimetre BSK’ların karıştırma ve sıkıştırma sırasında sıcaklık aralıklarını belirlemek için de kullanılmaktadır. 135 °C ve 165 °C’deki viskozite deneylerinin tamamlanmasının ardından, BSK’ların tasarımında kullanılacak ideal sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları logaritmik viskozite-sıcaklık grafiklerinden belirlenebilmektedir. Viskozite deneyinin iki farklı sıcaklıktaki değerlerinden elde edilen logaritmik viskozite-sıcaklık eğrisi Şekil 12’de verilmiştir. Superpave şartnamesine göre, karıştırma sıcaklıkları için 0.17 ± 0.02 Pa.s ve sıkıştırma sıcaklıkları için 0.28 ± 0.02 Pa.s arasındaki viskozite aralığı hesaplanarak ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı elde edilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Tablo 2. Orijinal ve EVA modifiyeli bağlayıcıların viskozite değerleri.

EVA Yüzdesi	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
0	398	112,5	1,00	1,00	153-158	141-146
%3	595	167,5	1,50	1,49	163-169	151-156
%4	673	190	1,69	1,69	166-171	154-159
%5	875	237	2,20	2,11	168-174	157-162
%6	964	285	2,42	2,53	173-179	161-167
%7	1075	299	2,70	2,66	174-180	163-168



Şekil 12. Orijinal ve EVA modifiyeli bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi.

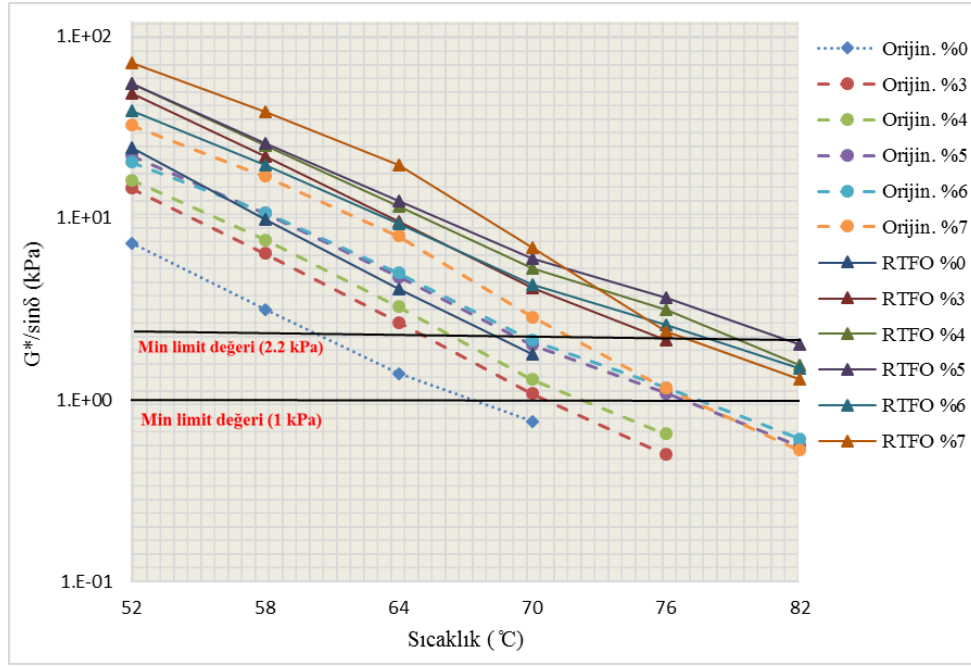
Bağlayıcıların BSK'lar için hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde (Şekil 12), EVA katkılı numunelerin saf bitüme göre (viskozite değerleriyle doğru orantılı olarak) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da artışların olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, modifiye bitümlerin sıcaklığa duyarlılığını önemli derecede düşürdüğünü ve bu şekilde bitümlerin sertleştiği anlamına gelmektedir. Örneğin, saf bağlayıcının karıştırma sıcaklığı 153-158°C ve sıkıştırma sıcaklığı 141-146°C iken, en yüksek modifikasyon seviyesinde karıştırma sıcaklığı 174-180°C, sıkıştırma sıcaklığı ise 163-168°C olarak hesaplanmıştır. Karıştırma sıcaklığının, genel olarak katkı üreticileri ve araştırmacılar tarafından 175-180 °C aralığını aşmaması önermişlerdir. Daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerine ulaşıldığında uygulama sırasında harcanacak olan enerji miktarı artmaktadır. Çalışmada, EVA katkılı bağlayıcıların bu şartı tüm yüzdelerde sağladığı görülmektedir.

3.2. EVA Modifiyeli Bağlayıcıların Reolojik Performansı

3.2.1. Dinamik Kayma Reometresi (DSR)

Şekil 13'te yaşlandırılmamış ve RTFO ile kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılara ait tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) sonuçları verilmiştir. Hem orijinal hem de yaşlandırılmış numunelerde katkı miktarlarının artmasıyla birlikte bitümlerin $G^*/\sin\delta$ parametrelerinde artışın meydana geldiği

gözlenmektedir. Katkının az miktarda (%3) orijinal bağlayıcıya ilave edilmesiyle tekerlek izi parametresinin az miktarda etkilendiği ancak katkı oranı arttıkça daha belirgin miktarlarda artışların sağlandığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık PG sınıflarının tespit edilmesi için yapılan DSR deneylerinde daha önce de belirtildiği üzere hem orijinal (yaşlandırılmamış) hem de RTFO ile yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır.



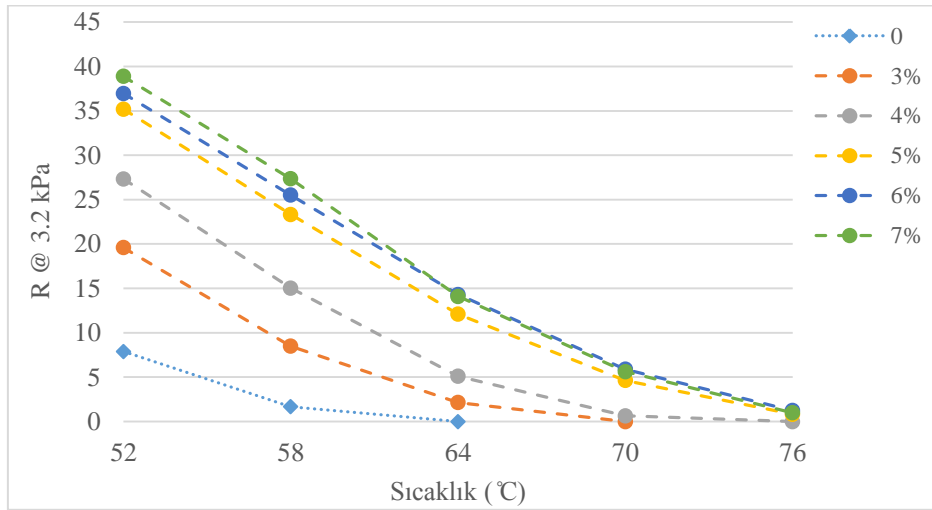
Şekil 13. Saf ve EVA modifiyeli bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi.

Superpave şartnamesine göre orijinal numuneler üzerinde yapılan DSR deneylerinde tekerlek izi değerinin en az 1.0 kPa, yaşlandırılmış numunelerde ise 2.20 kPa olması gerekmektedir. Buna göre, saf bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64, en düşük modifikasyonda (%3) katkı bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı ise bir üst sınıf olan PG 70 olarak belirlenmiştir. %5-%7 modifikasyon seviyelerinde ise yüksek sıcaklık sınıfının iki seviye artış sağladığı, diğer bir ifadeyle bu bağlayıcıların PG 76 sınıfına ait olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, bu bağlayıcı türlerinin 76°C sıcaklığa kadar trafik yükü etkisiyle meydana gelecek kalıcı deformasyonların sınırlı seviyede olduğunu ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılan en yüksek katkıli bağlayıcının (%7) $G^*/\sin\delta$ değerinin diğer tüm katkıli bitümlere göre daha yüksek olduğu ancak buna karşın performans sınıfının en üst sınıf olan PG 82'ye ulaşmadığı ve PG 76'da kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, DSR sonuçlarına göre %5 EVA katkısının performans açısından ideal katkı oranı olduğu düşünülmektedir.

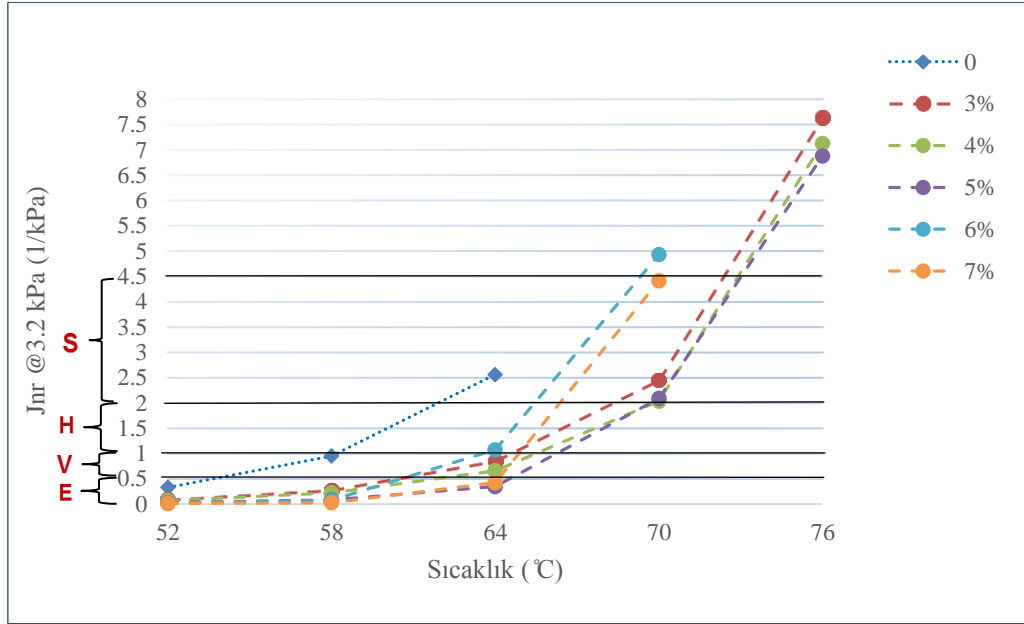
3.2.2. Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme (MSCR)

MSCR deneyi sonucunda elde edilen geri kazanılan deformasyon (% R) ve geri dönmeyen sünme uygunluğu (J_{nr}) değerleri Şekil 14 ve Şekil 15'te sunulmuştur. Tüm deney sıcaklıklarında bağlayıcılarda 3,2 kP gerilme seviyesinde katkı yüzdesinin artmasıyla birlikte % R 'nin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca % R 'nin artış oranının katkının artış oranıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, EVA katkısının, bitüme önemli ölçüde elastiklik sağladığı anlamına gelmektedir. Polimer katkılı bağlayıcılarda saf bitüme göre daha çok elastik deformasyon görülmektedir.



Şekil 14. Saf ve EVA modifiyeli bağlayıcıların geri kazanılan deformasyonu (% $R@3,2$ kPa).

Şekil 15'te görüldüğü üzere; polimer katkılı bağlayıcıların geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) saf bitüme göre daha düşüktür. J_{nr} değerinin düşük olması polimer modifiyeli bağlayıcının kalıcı deformasyonlara karşı direncini ifade etmektedir. AASHTO M332 şartnamesine dayanarak 3,2 kP gerilme seviyesindeki J_{nr} parametresi (tekerlek izi) farklı trafik seviyelerine göre aynı PG sınıfı içerisinde S: standard (standart), H: heavy (ağır), V: very heavy (çok ağır) ve E: extremely heavy (aşırı ağır) olarak sınıflandırılmış ve MSCR PG plus olarak adlandırılmıştır. MSCR PG plus sonuçları, geleneksel DSR PG sınıfları ile Tablo 3'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 15. Saf ve EVA modifiyeli bağlayıcıların MSCR PG Plus sınıflandırılması (%J_{nr}@3,2 kPa).

Tablo 3. Saf ve EVA modifiyeli bağlayıcıların MSCR PG Plus sınıfları.

Bitüm Türü	Klasik DSR PG	J _{nr} @3,2 kPa	MSCR PG Plus
B ₁	PG 64-Y	2,56	PG 64S-Y
B ₁ -3EVA	PG 70-Y	2,45	PG 70S-Y
B ₁ -4EVA	PG 70-Y	2,03	PG 70S-Y
B ₁ -5EVA	PG 76-Y	2,08	PG 70S-Y
B ₁ -6EVA	PG 76-Y	1,07	PG 64H-Y
B ₁ -7EVA	PG 76-Y	4,41	PG 70S-Y

Çalışmada kullanılan saf bitümün yüksek sıcaklıktaki klasik DSR performans sınıfı PG 64 iken MSCR Plus sınıflandırmasına göre PG 64S'tir (Tablo 3). Bu sonuçta, saf bitümün 64°C'ye kadar standart trafik yükleri altında yeterince sert ve yüksek elastisiteye sahip bir bağlayıcı olduğunu ifade etmektedir. EVA polimer katkısı saf bitüme en yüksek miktarda (%7) eklendiğinde MSCR Plus sınıfının PG 70S'a eriştiği görülmektedir. Bu sonuç, 70°C sıcaklıkta 70 km/s üzeri araç hızında ve yirmi yıl boyunca trafik dizayn şeridinde beklenen maksimum 10 milyon ESAL trafik yükü altında meydana gelecek kalıcı deformasyonların kabul edilebilir seviyede olduğunu ifade etmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında EVA polimer katkısının 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümün üzerinde etkisi fiziksel ve reolojik özellikler esas alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ EVA katkısı bitümün penetrasyonunu düşürdüğü ve yumuşama noktasını arttırdığı ve bu suretle bağlayıcıyı sertleştirdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, bitümde meydana gelen sertleşme neticesinde çeşitli bozulmaların azaltılabileceğini ifade etmektedir.
- ✓ Dönel viskozite sonuçlarına göre, modifiye bitümlerin saf bitüme göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir. Ancak yine de karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının, araştırmacılar tarafından en üst sınır olarak tavsiye edilen 175-180 °C aralığına erişmediği belirlenmiştir.
- ✓ DSR deneyinin sonucunda, EVA katkısının eklenmesiyle bağlayıcının tekerlek izi parametresinde artış tespit edilmiştir. En yüksek modifikasyon oranında (%7) PG 76 seviyesine (çalışmadaki en yüksek performans sınıfı) erişilmiştir.
- ✓ Saf bitümün MSCR Plus'a göre PG 64S olan sınıfının EVA katkılı bitümlerde bir üstü seviye olan PG 70S sınıfına yükseldiği tespit edilmiştir. Bu sonucun, trafik yüklerinin de değerlendirmeye katıldığı MSCR Plus sistemine ait olması önem arz etmekte ve bağlayıcıların EVA katkısı sonrasında sadece sıcaklık artışına karşı değil trafik yükü artışına karşı da direnç kazandığını ifade etmektedir.
- ✓ Çalışmada kullanılan EVA modifiyeli B50/70 bitümün orta sıcaklıktaki yorulma performansının araştırılması ve bu sayede optimum kullanım oranının belirlenmesi önerilmektedir.

Yazarların Katkısı

Çalışmada bütün yazarlar eşit oranda katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

AASHTO M332. (2014). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. In *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

AASHTO T315. (2012). Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). In *American Association of state and highway transportation*

officials (p. 33). Washington, DC.

- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., and Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design*, 32(10), 4844–4849. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>
- Airey, G. D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16(8), 473–487. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00103-4)
- Airey, G. D. (2004). Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(3), 137–151. <https://doi.org/10.1080/10298430412331314146>
- Al-Hadidy, A. I., & Yi-Qiu, T. (2009). Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements. *Materials & Design*, 30(4), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.021>
- Almusawi, A., Sengoz, B., and Topal, A. (2020). Investigation of Mixing and Compaction Temperatures of Modified Hot Asphalt and Warm Mix Asphalt. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 65(1), 72–83. <https://doi.org/10.3311/PPci.15118>
- Ameri, M., Mansourian, A., and Sheikhmotevali, A. H. (2012). Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology. *Construction and Building Materials*, 36, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.137>
- ASTM D2872. (2012). Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). In *USA: Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D36/D36M. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402. (2015). Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. *American Society for Testing and Materials*.
- Behnood, A. (2020). A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, 120817. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120817>
- Behnood, A., and Olek, J. (2017). Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 151, 464–478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115>
- Fernandes, M. R. S., Forte, M. M. C., and Leite, L. F. M. (2008). Rheological evaluation of polymer-modified asphalt binders. *Materials Research*, 11(3), 381–386. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392008000300024>
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O.,

- and Muñoz, M. E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00217-5)
- Haddadi, S., Ghorbel, E., and Laradi, N. (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1212–1219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.026>
- Hunter, R. N., Andy Self., and John Read. (2015). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- Kaya, D., Topal, A., and McNally, T. (2019). Correlation of processing parameters and ageing with the phase morphology of styrene-butadiene-styrene block co-polymer modified bitumen. *Materials Research Express*, 6(10), 105309.
- Hassanpour Kasanagh, S., (2020). *Geri Dönüştürülmüş Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Król, J., Radziszewski, P., and Kowalski, K. J. (2015). Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen. *Procedia Engineering*, 111, 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.119>
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W., and Solaimanian, M. (1995). *Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis*. United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications.
- Polacco, G., Stastna, J., Vlachovicova, Z., Biondi, D., and Zanzotto, L. (2004). Temporary networks in polymer-modified asphalts. *Polymer Engineering & Science*, 44(12), 2185–2193. <https://doi.org/10.1002/pen.20246>
- Sengoz, B., and Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>
- Köfteci, S., Gunay, T., and Ahmedzade, P. (2020). Rheological Analysis of Modified Bitumen by PVC Based Various Recycled Plastics. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(4), 04020063. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000214>
- Stastna, J., Zanzotto, L., and Vacin, O. J. (2003). Viscosity function in polymer-modified asphalts. *Journal of Colloid and Interface Science*, 259(1), 200–207. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00197-2)
- Zaniewski, J. P., and Pumphrey, M. E. (2004). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt Technology Program*, 107, 376-384