

## Farklı Polimerlerle Modifiye Edilmiş Asfalt Bağlayıcıların MSCR Testi Kullanarak Yüksek Sıcaklık Performanslarının Değerlendirilmesi

Erkut YALÇIN<sup>1\*</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> erkutyalcin@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mehmetyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/01/2024;

Kabul/Accepted: 19/03/2024)

**Öz:** Bu çalışmada çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) deneyleri kullanılarak farklı katkı maddelerinin asfalt bağlayıcıların gerilme kaynaklı davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf asfalt bağlayıcı farklı oranlarda SBS, 611 ve 701 polimerleri ile modifiye edilmiştir. Deney 6 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve her döngüde sünme geri dönme uyumu ( $J_{nr}$ ) ve geri kazanım yüzdesi (R) hesaplanmıştır. Ortalama  $J_{nr}$  ve ortalama R değerleri de farklı gerilme seviyelerinde hesaplanmıştır. Bulgular, tüm modifiye bağlayıcılar için daha yüksek gerilme seviyelerinin daha belirgin doğrusal olmayan davranışla ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle modifiye bağlayıcılar hem düşük hem de yüksek gerilme seviyelerinde artan sıcaklıklara karşı esnek özellik sergilemiştir. Ayrıca, elastic geri dönme değerleri farklı sıcaklıklarda her üç bağlayıcıda da katkı maddesinin artmasıyla artmıştır. Saf bağlayıcının elastic geri dönme özelliklerini geliştirme noktasında en iyi katkı maddesi 611 olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polimer, modifikasyon, MSCR, katkı ilavesi.

### Evaluation of High Temperature Performance of Asphalt Binders Modified with Different Polymers Using MSCR Test

**Abstract:** In this study, the effects of different additives on the stress-induced behaviour of asphalt binders were investigated using multiple stress creep recovery test (MSCR) experiments. Pure asphalt binder was modified with different proportions of SBS, 611 and 701 polymers. The experiment was carried out at 6 different temperatures and the creep recovery compliance ( $J_{nr}$ ) and recovery percentage (R) were calculated for each cycle. Average  $J_{nr}$  and average R values were also calculated at different stress levels. The results showed that higher stress levels were associated with more pronounced nonlinear behaviour for all modified binders. In particular, the modified binders exhibited resilient behaviour against increasing temperatures at both low and high stress levels. Furthermore, the elastic return values increased with increasing additive in all three binders at different temperatures. The best additive for improving the elastic return properties of the pure binder was determined as 611.

**Key words:** Polymer, modification, MSCR, additive addition.

#### 1. Giriş

Tekerlek izi oluşumu, asfalt kaplamada tekrarlı yüklemeler ve ağır yüklerin neden olduğu önemli bir hasar şeklidir. Bu hasar asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleriyle yakından ilişkilidir [1,2]. Superpave performans sınıflandırma (PG) sisteminde, asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi performansı geleneksel olarak  $|G^*|/\sin\delta$  tekerlek izi faktörü ile karakterize edilir, burada  $|G^*|$  dinamik kayma modülüdür ve  $\delta$  faz açısıdır [3]. Tekerlek izi faktörü, doğrusal viskoelastik (LVE) teorisine dayalı olarak küçük salımlı yüklemelerde dağılan enerji yoğunluğundan türetilir [4]. Bu parametre mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, polimer modifiyeli ve kırıntı kauçuk modifiyeli bağlayıcılar için asfaltın kalıcı deformasyona karşı direncini gerçekçi bir şekilde değerlendiremediğini göstermektedir [2]. Asfalt karışımlarında kalıcı deformasyona gerçekten katkıda bulunan ve viskoz akışta harcanan enerji, geri kazanılabilir viskoelastik deformasyonda harcanan enerjiden etkili bir şekilde ayırt edilemez [4].

Tekerlek izi faktörü testine alternatif olarak çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi geliştirilmiştir [5, 6]. MSCR testi düşük gerilim seviyesi (0.1 kPa) ve yüksek gerilim seviyesi (3,2 kPa) kullanır. Her iki gerilim seviyesinde de ön sünme (1s) - toparlanma (9s) döngüsü gerçekleştirilir [7]. İki parametre, kalıcı sünme uyumu  $J_{nr}$  ve geri kazanım yüzdesi R, her yüklemeye döngüsünden hesaplanabilir. Her bir gerilim seviyesindeki ön döngü boyunca her iki parametrenin ortalaması, bağlayıcıların gerilime bağlı doğrusal olmayan viskoelastik özelliklerine erişim için ayrıca kullanılabilir. Bazı çalışmalar,  $J_{nr}$ 'nin karışımın tekerlek izi performansı ile tatmin edici bir korelasyon sergilediğini göstermiştir [6, 8-10]. Diğer çalışmalar MSCR testinin [11,12] potansiyel iyileştirmeleri ve sınırlamalarının yanı sıra MSCR testinin temel deneysel parametrelerinin

\* Sorumlu yazar: [erkutyalcin@firat.edu.tr](mailto:erkutyalcin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-6389-4211, <sup>2</sup> 0000-0002-2761-2598

etkisini [13] tartışmıştır. MSCR testi, saf ve modifiye bağlayıcılar arasındaki tekerlek izi direncindeki farkı daha iyi tanımlayabildiğinden [5,9,14,15], yeni geliştirilen Superpave PG spesifikasyonuna dahil edilmiştir [16]. Wasage ve ark. [8], MSCR testinin sünme-elastik geri dönmesini sırasıyla simüle etmek için sürekli bir gecikme spektrum modeli ve doğrusal olmayan bir viskozite modeli kullanmıştır. Delgadillo ve ark. [17] ve Saboo ve Kumar [19] MSCR gerinim sonuçlarını tahmin etmek için güç yasası modellerini kullanmıştır. Bu modeller basittir ancak parametre sayılarının az olması nedeniyle büyük gerilimlere maruz kalan bağlayıcılar için kullanıldığında ciddi zorluklarla karşılaşabilirler. Gerilime bağlı doğrusal olmayan viskoelastik (NLVE) davranışını simüle etmedeki doğruluğu artırmak için Masad ve ark. [19], Schapery modelinin [20] basitleştirilmiş bir formunu çalışmışlardır. Sadeq ve ark. [21] bu yöntemi ayrıca sıcak karışım katkı maddeleri içeren asfalt bağlayıcıların doğrusal/doğrusal olmayan viskoelastik ve geri kazanılmaz davranışlarını analiz etmek için kullanmışlardır. Liu ve diğerleri. [22], Schapery'nin NLVE modelini kullanarak 3.2 kPa'da on döngü için ortalama gerinim tepkisini modelledi. Luo ve diğerleri. [23] MSCR testinin sünme-elastik geri dönme karakterize etmek için Schapery ve Perzyna modellerini ayrı ayrı kullandılar.

Bu çalışma, çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testlerini kullanarak SBS, 611 ve 701 katkılarının asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, asfalt bağlayıcıların gerilime bağlı davranışını ve tekerlek izi oluşumuna duyarlılığını incelemek için her biri farklı gerilim seviyelerine ve değişen sayıda çevrim ve yükleme koşullarına sahip iki seri standart dışı MSCR testi kullanılmıştır. Bu deneysel araştırma tamamlandıktan sonra çeşitli katkı maddelerin (yani SBS, 601 ve 701) asfalt bağlayıcıların gerilime bağlı davranışları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Mevcut Superpave asfalt bağlayıcı deneylerinde, tekerlek izi, DSR deneyinden elde edilen  $G^*/\sin\delta$  değeri ile ilişkilendirilmekteydi. Bu ilişki modifiye edilmeyen bağlayıcılarda iyi sonuç vermekte ancak modifiye bağlayıcılarda başarısız olmaktadır. Buna karşın yeni geliştirilen MSCR deneyinden elde edilen parametrenin ( $J_{nr3.2}$ ) hem modifiye hem de modifiye edilmeyen bağlayıcılarda gerçek tekerlek izi ile yüksek bir korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Zhang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kauçuk modifiyeli bağlayıcı kullanılmışlardır. Bağlayıcılar üzerinde MSCR teti yapmışlardır. MSCR test sonuçlarına göre, kauçukla modifiye edilmiş asfalt üretmek için daha düşük kauçuk inceliği veya daha düşük dereceli saf asfalt kullanıldığında birikmiş gerinimin önemli ölçüde azaldığını doğrulamışlardır [24]. Wu ve ekibinin yaptıkları çalışmada, kuru proses kauçuklu asfalt karışımında kauçuğun asfalt bağlayıcı üzerindeki reolojik etkisini incelemişlerdir. Kauçuk modifikasyonu asfalt bağlayıcının elastik özelliğini ve deformasyon direncini arttırmasına rağmen, asfalt bağlayıcının gerilme hassasiyetini azaltmıştır [25].

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada, modifiye asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerini ve gerilime bağlı davranışlarını incelemek için saf bir bağlayıcı üç farklı katkı maddeleriyle modifiye edilmiştir. Saf bağlayıcının penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve penetrasyon indeksi değerleri sırasıyla 62dmm, 53.3°C, 245°C ve 0.119 olarak belirlenmiştir. Bu bağlayıcıların reolojik özelliklerine ilişkin daha fazla bilgi literatürdeki çalışmada yer almaktadır [26]. Katkı maddelerin türü ve miktarı da dahil olmak üzere modifiye bağlayıcıların ayrıntıları Tablo 1'de sunulmaktadır.

**Table 1.** Saf ve modifiye bağlayıcıların isimlendirilmesi

Bağlayıcı tipi kısaltması	Polimer içeriği (%)			
	0	2	3	4
SBS	-	M1	M3	M5
701	-	M6	M8	M10
611	-	M11	M13	M15
Saf bitüm	S1-S2	-	-	-

### 2.2. Modifiye Bitüm Hazırlama

Saf bağlayıcıya üç farklı oranda (%2, %3 ve %4) polimerler ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Bu üç oranın seçilmesinin sebebi önceki çalışmalarda kullanılan en çok oranlar olmasıdır. Modifiye bağlayıcıların hazırlanmasında yüksek hızlı karıştırıcı kullanılmıştır. İlk önce saf bitüm 170±5°C sıcaklıktaki etüvde 30 dakika ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Daha sonra mikserin metal kabına 400g sıvı hale gelmiş bitüm ilave edilmiştir. Metal haznedeki bitüm, 170±5°C'de şartlandırılmış ısıtıcı kaynağı üzerinde termal gömlek

içinde bırakıldı ve ısıtıcı,  $170\pm 5^\circ\text{C}$  termal dengeye ulaşınca kadar çalışır durumda tutulmuştur. Tartılan bitüm ağırlığına göre önceden belirlenmiş yüzde de polimer katkısı ilave edilmiştir. Bitüm içeren polimerleri hazırlamak için 1000 rpm'de bir saat çalışan mekanik bir karıştırıcı kullanılmıştır [26]. Oksidasyon etkisini belirlemek için saf bağlayıcı da aynı şartlar kullanılarak karıştırılmıştır. Saf bağlayıcının modifiye bitüm karıştırma prosesinden geçirilmesiyle S1 bağlayıcı üretilmiştir. Penetrasyon derecesi 50/70 olan saf bitüm, S2 sembolü ile gösterilmiştir.

### 2.3. Çoklu Gerilme Uygulaması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Testi

Bu çalışmada, AASHTO T350 kurallarına bağlı kalarak T315 (AASHTO T315, 2019) standartlarına uygun olarak üretilen hem saf bağlayıcılar hem de atık yağlı bağlayıcılar üzerinde çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi yapılmıştır. Asfalt bağlayıcı numunesi 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığındadır. Test, DSR makinesindeki su banyosu kullanılarak kontrol edilen asfalt bağlayıcının yüksek çalışma sıcaklığında gerçekleştirilir. MSCR testi  $58^\circ\text{C}$ - $88^\circ\text{C}$  sıcaklıkları arasında yapılmıştır. MSCR testi  $58^\circ\text{C}$ 'den başlayarak her  $6^\circ\text{C}$ 'de bir sıcaklık artırılarak  $88^\circ\text{C}$ 'ye kadar test yapılmıştır. Her döngü için numuneye 1 saniye boyunca kayma yükü uygulandıktan sonra, 9 saniyelik bir dinlenme periyodu uygulanır. İki kez 0.1 kPa ve bir kez 3.2 kPa olmak üzere iki gerilim seviyesi art arda uygulanmakta ve her bir gerilim seviyesi için toplam 10 çevrim gerçekleştirilmektedir. Uygulanan 0.1 kPa gerilme seviyesinden ikinci sonuçlar ve 3.2 kPa seviyesindeki sonuçlar alınarak değerlendirilir. MSCR testi, asfalt bağlayıcının kayma sürünme yükü altında geri kazanım ve geri kazanım yüzdesi olan geri kazanım ve geri kazanılmama özelliklerini karakterize etmektedir. Kurtarılabılır sürünme uyumluluğu ( $J_{nr}$ ).  $J_{nr}$ , BSK'nın tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için kullanılır ve kurtarılamayan kayma geriliminin kayma gerilimine bölünmesiyle belirlenir.  $J_{nr}$ 'nin matematiksel ifadesi Denklem 1, 2 ve 3'te gösterildiği gibidir:

$$J_{nr0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [J_{nr}(0.1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$J_{nr3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [J_{nr}(3.2, N)]}{10} \quad (2)$$

$$J_{nr\text{diff}} = \frac{(J_{nr3.2} - J_{nr0.1})}{J_{nr0.1}} * 100 \quad (3)$$

AASHTO M332 (2015)'e göre, sırasıyla 0.1 ( $R_{0.1}$ ) ve 3.2 ( $R_{3.2}$ ) kPa kayma gerilimi değerleri için bitümlü bağlayıcıların ortalama geri kazanım oranlarını ( $R$ ) belirlemek için Denklem 4 ve 5 kullanılır.

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (4)$$

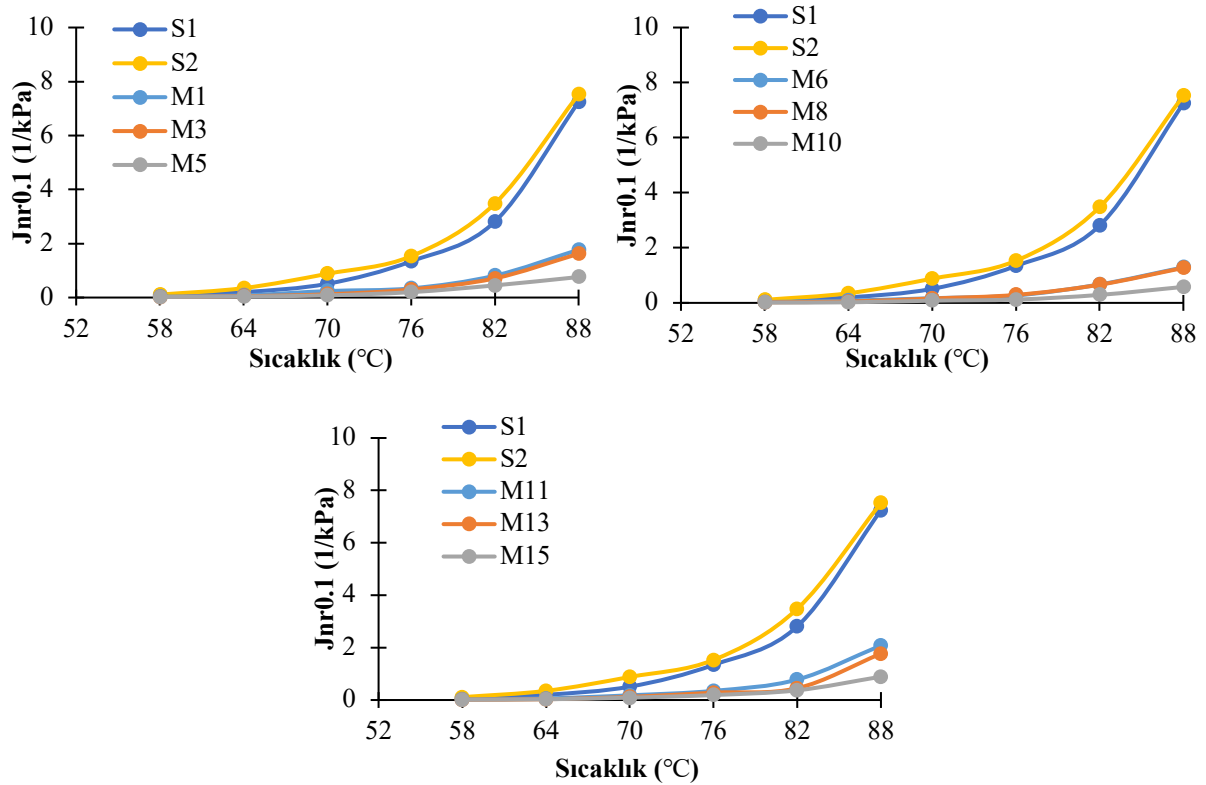
$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (5)$$

Bu denklemlerde N, herhangi bir gerilim seviyesindeki döngü sayısını temsil ederken, N döngülerdeki ve 0.1 ve 3.2 kPa gerilim seviyelerindeki iyileşme yüzdeleri sırasıyla  $\varepsilon_r(0.1, N)$  ve  $\varepsilon_r(3.2, N)$  olarak gösterilir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. MSCR Deney Sonuçları

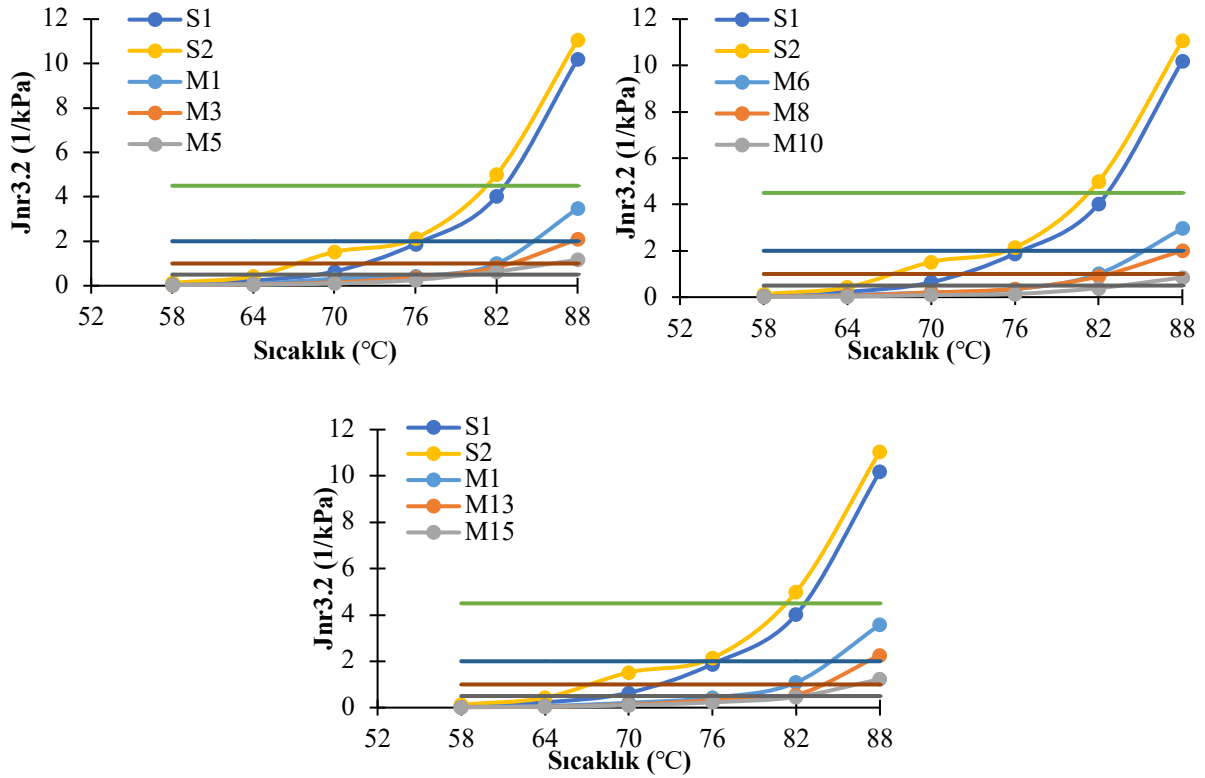
Şekil 1'de SBS, 701 ve 611 katkılı bağlayıcıların  $J_{nr0.1}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Sıcaklığın artması ile bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri artmaktadır. Bu artış saf bağlayıcıda 76 °C'den itibaren önemli derecede meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan üç katkı türü içinde en fazla saf karışımların  $J_{nr}$  değerlerinde artış meydana gelmektedir. SBS ve 701 modifikasyonunda  $J_{nr}$  değerlerindeki artışın belirgin olmaya başladığı sıcaklık 76 °C'dir. 611 katkılı bağlayıcılarda da bu belirgin artış 76 °C'den sonra olmaktadır. 76 °C'den sonra en hızlı artış gösteren bağlayıcı 611 katkılı bağlayıcılardır. Modifiyeli bitümlü karışımların yüksek sıcaklık ve düşük gerilme durumunda tekerlek izine karşı dirençli olacağı açıktır. Üç katkının da bağlayıcılarda kullanılması yüksek sıcaklıklarda önemli bir tekerlek izi direnci göstermektedir. Üç katkı türü de yüksek sıcaklıklarda yaklaşık benzer  $J_{nr}$  değerleri vermektedir. Bütün bağlayıcılar içinde M10 bağlayıcısı her sıcaklıkta en düşük  $J_{nr}$  değerlerini vermiştir. Tüm sıcaklıklarda en yüksek  $J_{nr}$  değerini ise S2 bağlayıcısı vermektedir. Katkı içeriğinin  $J_{nr}$  üzerindeki bu iyileştirme etkisi %2 SBS, %2 701 ve %2 611 gibi düşük katkı içeriğinde önemli bir şekilde meydana gelmekte daha sonra katkı içeriğinin artması ile bu iyileştirme etkisi azalarak devam etmektedir. %2 SBS katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri S2 bağlayıcısına göre 58, 64 ve 70 °C'de 3.7; 4.4; 3.7 kat azalmaktadır. Bu azalışlar %2 701 katkılı bağlayıcıda 3.7;7;5.5 kat olmaktadır. Bu azalışlar %2 611 katkılı bağlayıcılarda ise 5.5; 5.8; 4.9 kat olmaktadır. En yüksek  $J_{nr0.1}$  değeri tüm katkılı bağlayıcılarda 88°C'de meydana gelmektedir. En düşük  $J_{nr0.1}$  değerleri 701 katkılı bağlayıcılarda meydana gelmektedir.



Şekil 1.  $J_{nr0.1}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

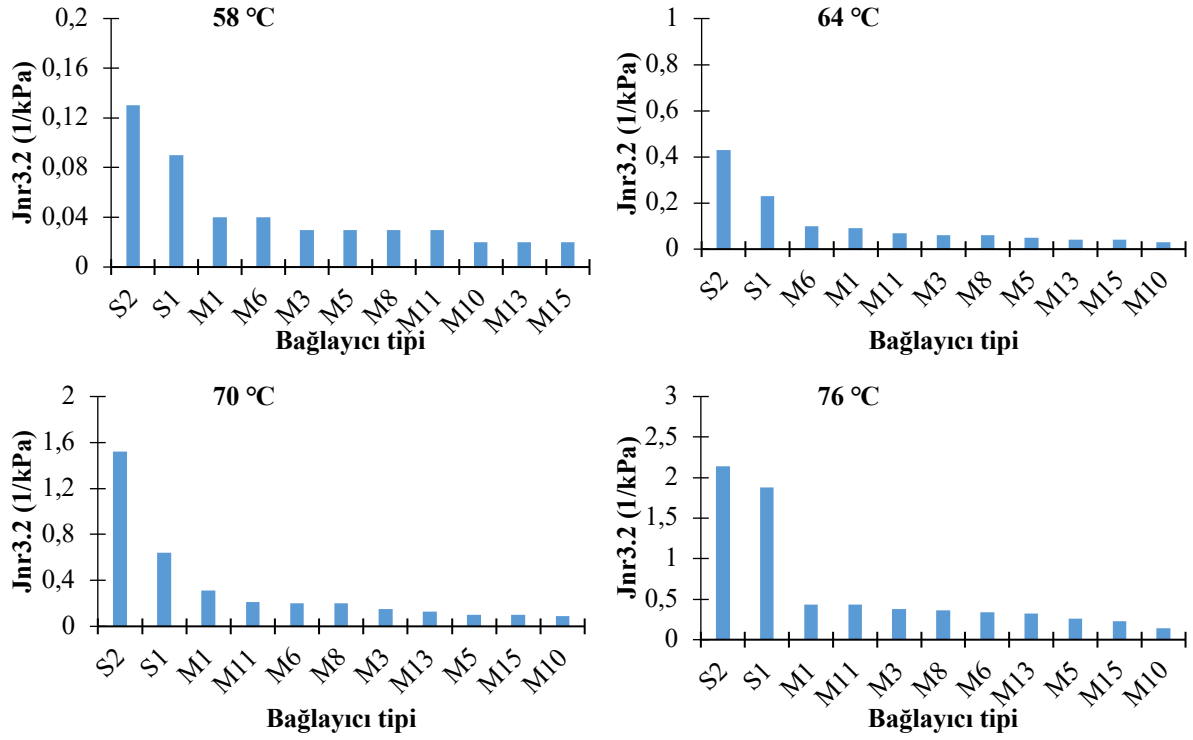
Bağlayıcıların yüksek kesme gerilmesi (3.2 kPa) seviyesinde katkı içeriği ile  $J_{nr}$  değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 2'de verilmiştir. SBS, 611 ve 701 modifikasyonlarında  $J_{nr}$  değerleri katkı içeriğinin artması ile düzenli olarak azalmıştır. Üç katkı türünde de 88°C'de hızlı bir azalış söz konusudur. Katkı içeriğinin düşük sıcaklıklarda  $J_{nr}$  üzerinde çok fazla etkili olmazken yüksek sıcaklıkta (82 °C) etkisini sürdürmektedir. Tüm katkılı bağlayıcılar da 58, 64 ve 70 °C'de birbirine benzer  $J_{nr}$  değeri vermektedir. Her iki modifikasyonda da yüksek sıcaklıkta katkı oranlarının  $J_{nr}$  üzerindeki etkisi daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla katkı oranının etkinliğini

değerlendirmede sıcaklık olarak en az 76°C'nin kullanılması uygun görülmektedir. Sıcaklığın artması ile hem  $J_{nr}$  değerleri hem de  $J_{nr}$  değerleri arasındaki fark önemli derecede artmaktadır. Şekil 2'de ayrıca bağlayıcıların performans seviyelerini belirten limit değerler de görülmektedir.  $J_{nr}$ diff değerleri dikkate alınmaksızın 611 modifikasyonunun SBS modifikasyonuna kıyasla yüksek hacim ve ağırlıktaki trafiği taşıma konusunda yetersiz kaldığı görülmektedir. 76 °C'de tüm modifiyeli bağlayıcıların  $J_{nr3.2}$  değerleri 0.5 kPa'dan küçük olduğu için "E" sınıfına sahiptir. E sınıfı olduğundan trafiği oldukça ağır bir trafiktir. 82 °C'de, M6, M10, M11 ve M15 bağlayıcıları hariç "V" sınıfına girmektedirler. V sınıfı çok ağır trafiği ifade etmektedir. M6 ve M11 bağlayıcıları ise 2°C'de ağır trafik (H) sınıfına girmektedir. 88 °C'de ise M5, M10 ve M15 bağlayıcıları hariç diğer bağlayıcıların hepsi S sınıfına girmektedir.



Şekil 2.  $J_{nr3.2}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

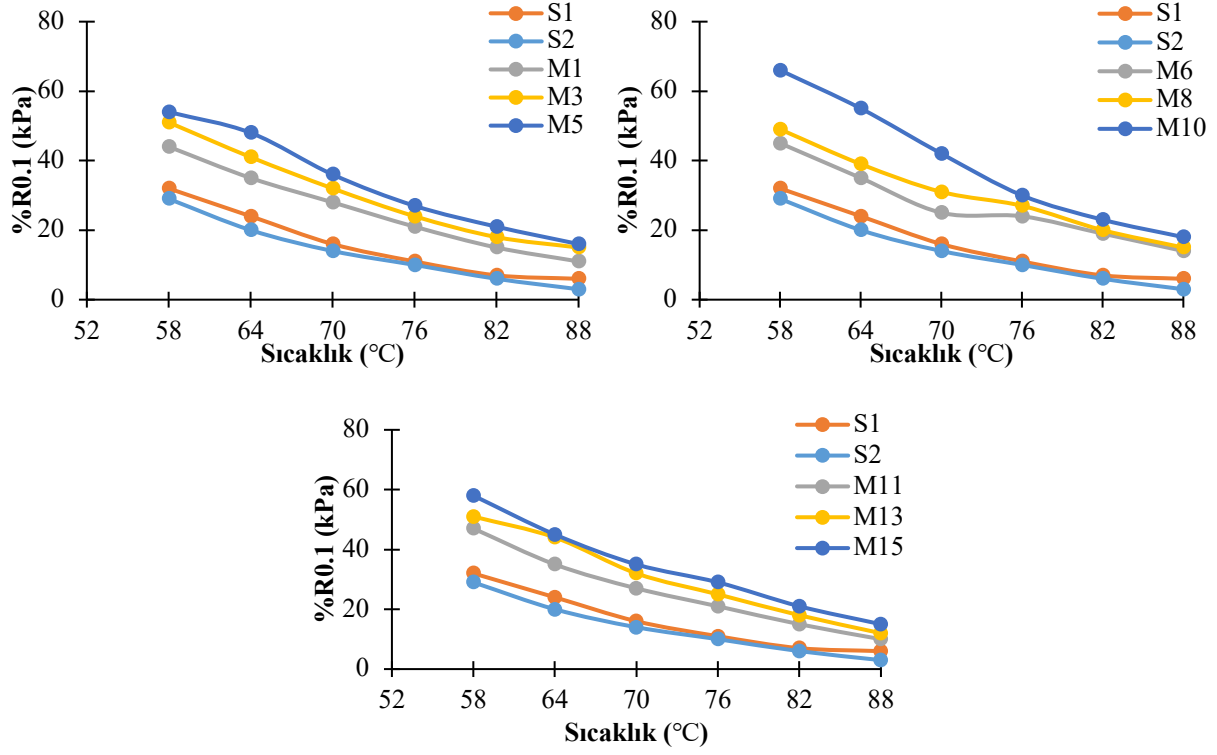
Şekil 3'te bütün bağlayıcıların  $J_{nr3.2}$  değerleri büyükten küçüğe doğru sıralı olarak verilmiştir. Üç farklı elastomer katkılı bağlayıcıların bütün sıcaklıklarda  $J_{nr}$  değerlerinde değişiklik görülmektedir. M10 bağlayıcısı 58°C'deki sıcaklık hariç diğer bütün sıcaklıklarda en düşük üç  $J_{nr}$  değerini vererek en iyi tekerlek izi direncine sahip bağlayıcı olmuştur. Bunun yanı sıra en yüksek  $J_{nr}$  değerini ise tüm sıcaklıklarda S2 bağlayıcısında görülmektedir. 58°C'de en düşük  $J_{nr}$  değerini ise M15 bağlayıcısından elde edilmiştir. Diğer taraftan %2 SBS modifikasyonun  $J_{nr}$  değeri 70°C ve 76 °C'de sırasıyla 3.7 ve 4.5 kat azaltılmaktadır.



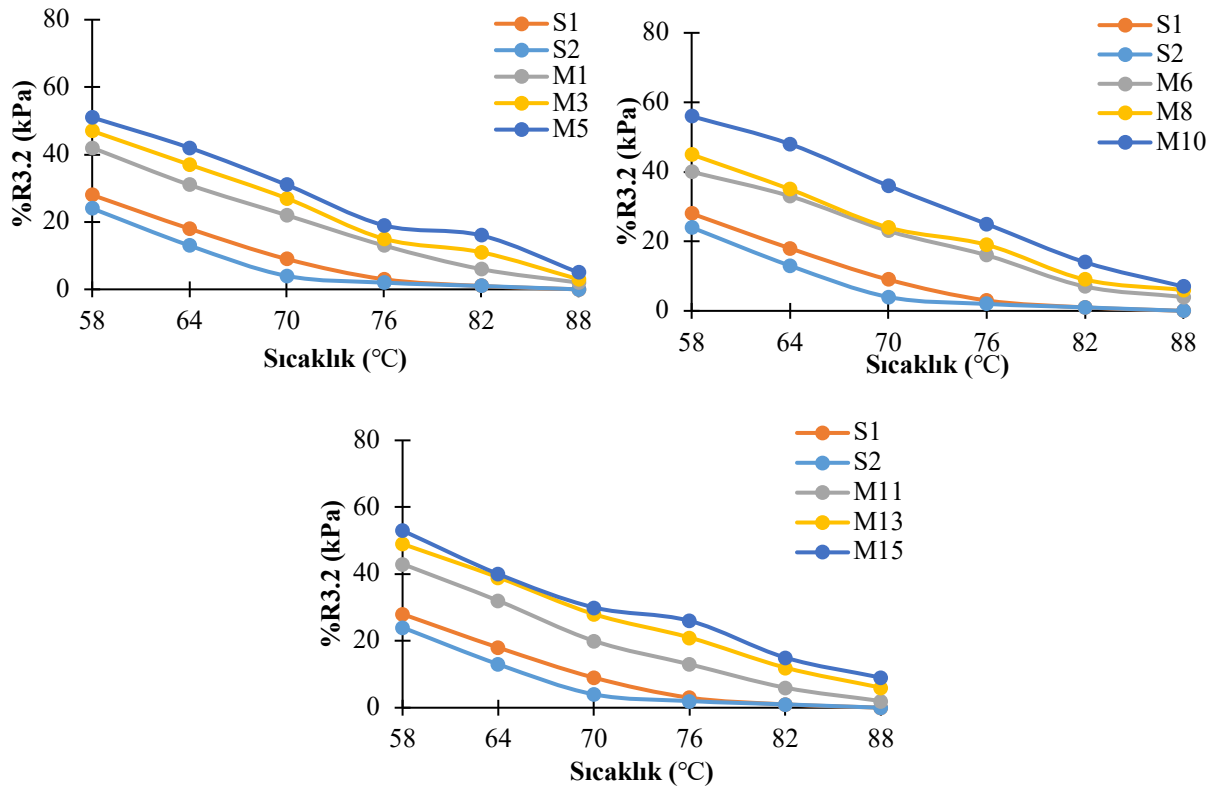
Şekil 3. Bütün bağlayıcıların  $J_{nr3,2}$  değerlerinin sıralı olarak değişimi

Saf bağlayıcılar hariç modifikasyonların tümü sıcaklığın artması ile esnekliğini daha iyi koruyabilmektedir (Şekil 4). %3 SBS katkılı bağlayıcı 0.1 kPa gerilme seviyesinde sıcaklığın 58 °C'den 76 °C'ye yükselmesi durumunda elastikliğinin 2.68'ini kaybetmektedir. %3 701 katkılı bağlayıcı ise sadece %1.81'ini kaybetmektedir. 70°C'de %4 SBS, %4 701 ve %4 611 katkılı bağlayıcılar S1 bağlayıcısının %R değerlerini sırası ile 1.37; 1.41 ve 1.47 kat artırırken S2 bağlayıcısına göre ise sırasıyla 1.52; 1.56 ve 1.62 kat artırmaktadır. Bu sonuçlar bize modifiye bitüm hazırlama sürecindeki saf bağlayıcıdaki yaşlanmayı göstermektedir. %4 701 katkılı bağlayıcı her sıcaklıkta en yüksek geri dönme değerlerine sahiptir. Üç katkı oranı içinde 76 °C'den sonra elastiklerinin sıcaklıkla değişimi konusunda benzer performans gösterdikleri görülmektedir. Elastik geri dönme değerleri bütün sıcaklıklarda her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile artmaktadır. Bu artış SBS modifikasyonunda 58 ve 64 °C'de katkı içeriğinin artması ile sürekli meydana gelirken 70 °C ve 76 °C'de %4 katkı içeriğinden sonra çok fazla değişmemektedir. Tüm modifikasyonlar da ise %R değerleri her sıcaklıkta katkı içeriğinin artması ile düzenli olarak artmaktadır. 58 °C'de en elastik geri dönme değerini 701 katkısı içeren bağlayıcıda 1.82 kat az elastik geri dönme sağlamaktadır.

SBS, 701 ve 611 modifiyeli bağlayıcıların 3.2 gerilme seviyesinde elastik geri dönme değerlerinde sıcaklıkla meydana gelen değişim Şekil 5'de verilmiştir. SBS modifikasyonunda sıcaklığın artması ile %R değerlerinde meydana gelen azalış daha belirgindir. 76°C'ye kadar hızlı bir azalış meydana gelirken 76 °C'den sonra azalış hızı azalmaktadır. S1 ve S2 bağlayıcıların esnekliği sıcaklıktan benzer şekilde etkilenmektedir. Sıcaklığın 58 °C'den 76 °C'ye çıkması durumunda %4 SBS, %4 701 ve %4 611 katkılı bağlayıcı esnekliklerinin sırası ile %62.7; %55.4 ve %50.9'unu kaybetmektedir. Düşük gerilme seviyesinde olduğu gibi yüksek gerilme seviyesinde de tüm modifiyeli bağlayıcılar sıcaklık artışı ile esnekliğini daha iyi bir şekilde koruyabilmektedir. Her üç modifikasyonda da gerilmenin 0.1 kPa'dan 3.2 kPa çıkması durumunda elastiklikteki artış yüksek katkı oranında da devam etmektedir. Yüksek gerilmede yüksek katkı oranları düşük gerilmeye göre daha etkili olmaktadır. Diğer taraftan gerilmenin artması ile elastiklik değerleri azalmaktadır. 76 °C'de %2SBS katkılı bağlayıcının 0.1 kPa gerilme seviyesindeki %21 olan elastikliği 3.2 kPa gerilme seviyesinde %13 değerine düşmektedir. Aynı şartlar altında %2 701 ve %2 611 katkılı bağlayıcılarda 0.1 kPa gerilme seviyesindeki %45 ve %47 olan elastikliği 3.2 kPa gerilme seviyesinde ise %40 ve %43 değerine düşürmektedir.

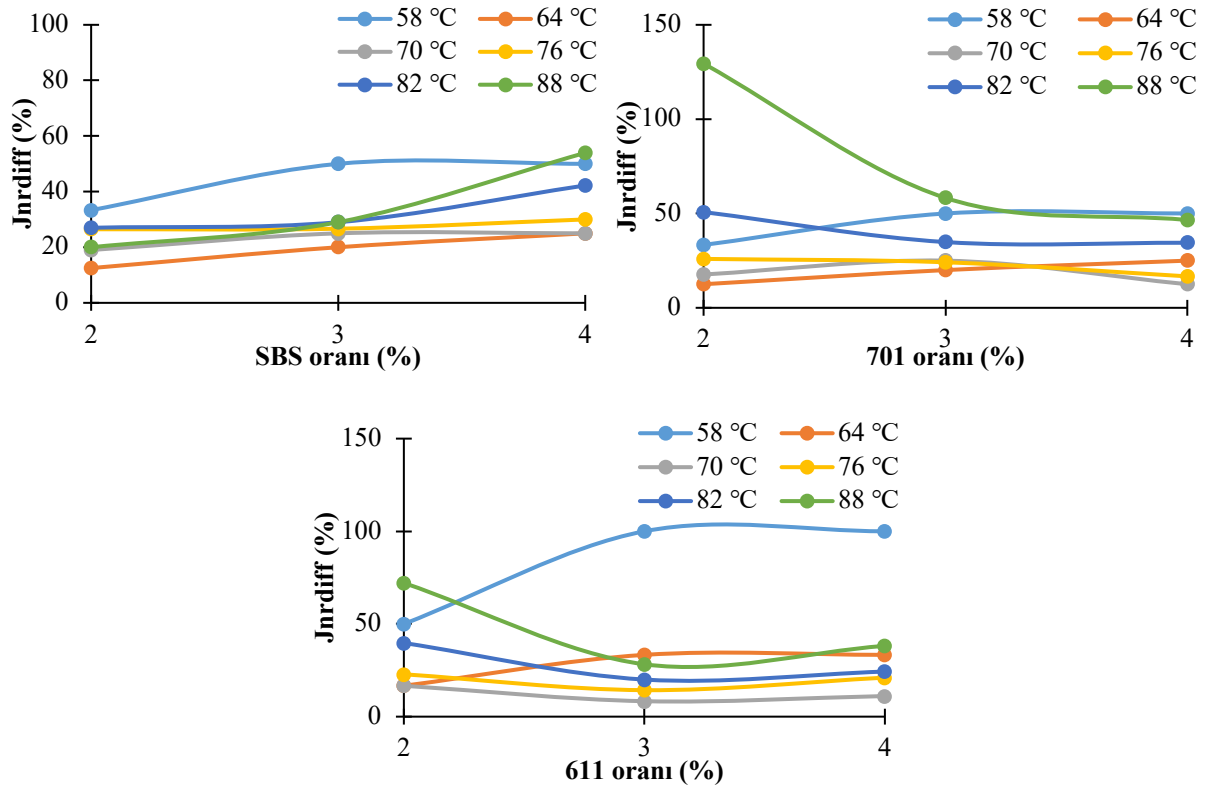


Şekil 4. 0.1 gerilme seviyesinde %R – sıcaklık ilişkisi



Şekil 5. 3.2 kPa gerilmede %R değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Bağlayıcıların 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme toparlanmaları arasındaki farkın ( $J_{nr,diff}$ ) %75'ten büyük olması tekerlek izine karşı hassasiyete işaret etmektedir. Şekil 6'da bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerlerindeki değişim verilmiştir. Bütün katkılar incelendiğinde  $J_{nr,diff}$  değerlerinde belirgin bir değişiklik görünmemektedir. SBS modifikasyonunda  $J_{nr,diff}$  değerleri 58°C dışında tüm sıcaklıklarda katkı içeriği arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde artış görünmektedir. 701 modifikasyonunda 64°C dışında sıcaklık arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde sürekli arttığı söylenebilir. 611 modifikasyonunda 64°C dışında sıcaklık arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde sürekli artmaktadır. Sıcaklığın artması ile her üç modifikasyonda ve katkıların birlikte kullanılması durumunda  $J_{nr,diff}$  değerleri olumsuz etkilenmektedir. Bağlayıcılar 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesinde çok yüksek oranda elastik özellik göstermiş olduğundan M6 bağlayıcısı hariç tüm bağlayıcılar şartname gereksinimini sağlayarak ve dolayısıyla kalıcı deformasyonlara karşı hassas olmadığı belirlenmiştir. Bağlayıcılardan sadece M6 bağlayıcısı 88 °C'de %75'ten yüksek  $J_{nr,diff}$  değerleri vermektedir. Buna karşın saf bağlayıcı 70 °C'de bile %35 gibi çok düşük bir  $J_{nr,diff}$  değeri verse de 611 katkılı bağlayıcılar tekerlek izine en dirençli bağlayıcı olarak görünmektedir. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da ele alınmış ve mevcut  $J_{nr,diff}$  belirlenme yönteminin gerçeği yansıtmadığı belirtilmiştir.



Şekil 6. Bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerlerindeki değişim

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, modifiye bağlayıcıların gerilime bağlı davranışını incelemek için kontrol katkısız bağlayıcıya üç farklı katkı maddeleri eklenmiştir. Kullanılan katkı maddeleri arasında stiren-butadiene-stiren (SBS), 611 ve 701 polimerleri yer alıyordu. Dinamik kayma reometresi (DSR) cihazı kullanarak çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile  $J_{nr}$  değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Katkı içeriğinin  $J_{nr}$  üzerindeki bu iyileştirme etkisi %2 SBS, %2 701 ve %2 611 gibi düşük katkı içeriğinde önemli bir şekilde meydana gelmekte daha sonra katkı içeriğinin artması ile bu iyileştirme etkisi azalarak devam etmektedir. Elastik geri dönme değerleri bütün sıcaklıklarda her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile



artmaktadır. Bu artış SBS modifikasyonunda 58 °C ve 64 °C’de katkı içeriğinin artması ile sürekli meydana gelirken 70 °C ve 76 °C’de %4 katkı içeriğinden sonra çok fazla değişmemektedir. Düşük gerilme seviyesinde olduğu gibi yüksek gerilme seviyesinde de tüm modifiyeli bağlayıcılar sıcaklık artışı ile esnekliğini daha iyi bir şekilde koruyabilmektedir. SBS modifikasyonunda  $J_{nr,diff}$  değerleri 58°C dışında tüm sıcaklıklarda katkı içeriği arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde artış görülmektedir. Sıcaklığın artması ile her üç modifikasyonda ve katkıların birlikte kullanılması durumunda  $J_{nr,diff}$  değerleri olumsuz etkilenmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) kapsamında gerçekleştirilmiştir. FÜBAP’ın MF.20.33 Araştırma Projesi’ne sağladığı mali destek için teşekkür ederiz. E.Y. ve M.Y. fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi. E.Y. ve M.Y. sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

### Kaynaklar

- [1] Atul Narayan SP, Murali Krishnan J, Little DN, Rajagopal KR. Mechanical behaviour of asphalt binders at high temperatures and specification for rutting. *Int J Pavement Eng* 2017; 18 (10): 916–927.
- [2] Delgadillo R, Cho DW, Bahia H. Nonlinearity of repeated creep and recovery binder test and relationship with mixture permanent deformation. *Transp Res Rec* 2006; 1962 (1): 2–11.
- [3] AASHTO. Standard specification for performance-graded asphalt binder. AASHTO 2021; AASHTO M 320–21.
- [4] Delgadillo R, Nam K, Bahia H. Why do we need to change  $G^*/\sin\delta$  and how?. *Road Mater. Pavement Design* 2006; 7 (1): 7–27.
- [5] D’Angelo J. Current status of superpave binder specification. *Road Mater Pavement Design* 2009; 10 (sup1): 13–24.
- [6] D’Angelo JA. The relationship of the MSCR test to rutting. *Road Mater Pavement Design* 2009; 10 (sup1): 61–80.
- [7] AASHTO. Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR) 2013; AASHTO: AASHTO TP 70.
- [8] Wasage TLJ, Stastna J, Zanzotto L. Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test. *Int Pavement Eng* 2011; 12 (6): 561–568.
- [9] Radhakrishnan V, Ramya Sri M, Sudhakar Reddy K. Evaluation of asphalt binder rutting parameters. *Constr Build Mater* 2018; 173: 298–307.
- [10] Walubita LF, Ling M, Pianeta LMR, Fuentes L, Komba JJ, Mabrouk GM. Correlating the asphalt-binder mscr test results to the hma hwtt and field rutting performance. *J Trans Eng Part B: Pavements* 2022; 148 (3).
- [11] Skronka G, Blascik M, Vacin O, Jasso M. Impact of shear stress levels on validity of MSCR tests. *Road Mater Pavement Design* 2022; 24 (7):1820–1836.
- [12] Domingos MDI, Faxina AL. Literature review of the multiple stress creep and recovery, performance-related test. *J Trans Eng Part B: Pavements* 2021; 147 (1): 03121001.
- [13] Wang D, Zhu J, Porot L, Cannone Falchetto A, Damen S. Multiple stress creep and recovery test for bituminous binders – influence of several key experimental parameters. *Road Mater Pavement Design* 20123; 24 (sup1): 290–308.
- [14] Zhou Z, Gu X, Jiang J, Ni F, Jiang Y. Nonrecoverable behavior of polymer modified and reclaimed asphalt pavement modified binder under different multiple stress creep recovery tests. *Transp Res Rec* 2018; 2672 (28): 324–336.
- [15] Sun Y, Wang W, Chen J. Investigating impacts of warm-mix asphalt Technologies and high reclaimed asphalt pavement binder content on rutting and fatigue performance of asphalt binder through MSCR and LAS tests. *J Clean Prod* 2019; 219: 879–893.
- [16] AASHTO. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). AASHTO 2021; Test AASHTO M: 332–21.
- [17] Delgadillo R, Bahia HU, Lakes R. A nonlinear constitutive relationship for asphalt binders. *Mater Struct* 2011; 45 (3): 457–473.
- [18] Saboo N, Kumar P. A study on creep and recovery behavior of asphalt binders. *Constr Build Mater* 2015; 96: 632–640.
- [19] Masad EA, Huang CW, D’Angelo J, Little DN. Characterization of asphalt binder resistance to permanent deformation based on nonlinear viscoelastic analysis of multiple stress creep recovery (MSCR) test. *J Assoc Asphalt Paving Technol* 2009; 78: 535–566.
- [20] Schapery RA. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. *Polym Eng Sci* 1969; 9 (4): 295–310.
- [21] Sadeq M, Masad E, Al-Khalid H, Sirin O, Mehrez L. Linear and nonlinear viscoelastic and viscoplastic analysis of asphalt binders with warm mix asphalt additives. *Int J Pavement Eng* 2016; 19 (10): 857–864.
- [22] Liu H, Zeiada W, Al-Khateeb GG, Ezzet H, Shanableh A, Samarai M. Analysis of MSCR test results for asphalt binders with improved accuracy. *Mater Struct* 20121; 54 (2).
- [23] Luo X, Ling J, Li H, Zhang Y, Li Y. Nonlinear viscoelastoplastic kinetics for high-temperature performance of modified asphalt binders. *Mech Mater* 2023; 180: 104612.
- [24] Zhang L, Xing C, Gao F, Li T, Tan Y. Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt. *Constr and Build Mater*. 2016; 127: 466-474.
- [25] Zhengda W, Dongdong G, Zihao J, Yanhua X. The performance evaluation of extracted asphalt binder from dry process produced rubber modified asphalt mixture. *Constr and Build Mater*. 2023; 401: 131864.
- [26] Yalcin E, Demirbag A. Effects of modified binders obtained from different polymers on conventional and rheological properties. *Constr and Build Mater*. 2022; 357: 129366.