



## Investigation of conventional and rheological properties of bitumen modified with Selenizza natural asphalt

Baha Vural Kök<sup>1\*</sup>, Erkut Yalçın<sup>1</sup>, Mehmet Yılmaz<sup>1</sup>, Barış Büyük<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Fırat University, 23100, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Technical Construction, 34235 İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Modification of bitumen with Selenizza natural asphalt
- Determining the effect of Selenizza bitumen on high and low temperature performance of pure bitumen
- Multi stress creep recovery parameters of Selenizza and Styrene-butadiene-styrene modified binders

### Keywords:

- Natural asphalt
- Modification
- SBS
- Conventional properties
- Rheological properties

### Article Info:

Research Article

Received: 18.06.2021

Accepted: 15.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.954272

### Correspondence:

Author: Baha Vural Kök  
e-mail: bvural@firat.edu.tr  
phone: +90 424 237 0000 / 5418

### Graphical/Tabular Abstract

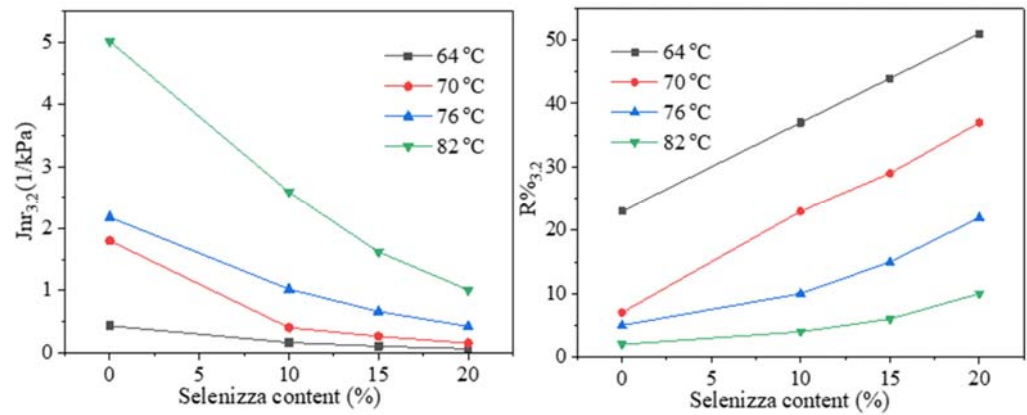


Figure A. High temperature properties of Selenizza modified bitumen

### Purpose:

This study aims to determine the effects of using Selenizza, a natural asphalt type, with pure binder and to determine the performance of the Selenizza modification with different content in terms of low and high temperature performance by comparing it with the Styrene-butadiene-styrene (SBS) modification.

### Theory and Methods:

In this study, the effects of Selenizza bitumen, a natural asphalt type, on the softening point, penetration, viscosity, rutting parameter, creep recovery and low temperature properties of bituminous binders were investigated. The low and high temperature performance of Selenizza bitumen-containing binders with different content was compared with pure and 3% Styrene-butadiene-styrene modified binders.

### Results:

With the increase of Selenizza content, the softening point increased linearly. 15% Selenizza modification could maintain its visco-elastic behavior up to 7 °C higher temperature than pure binder. Viscosity increased exponentially with the increase of Selenizza content. Although the addition of 20% Selenizza did not pose a problem in terms of workability, its viscosity at 135 °C was 30% lower than the 3% SBS modification. With the increase of Selenizza content, the high temperature performance of the binders improved significantly (Figure A). 15% Selenizza addition was in the same high temperature performance grade with 3% SBS modification. The addition of 10% Selenizza made the pure binder above 70 °C suitable for extremely heavy traffic conditions. Stiffness at low temperatures increased significantly with the increase of Selenizza content.

### Conclusion:

It has been determined that Selenizza modification will show a significant performance increase compared to pure binder especially in regions with high temperature and high traffic volume. The addition of 15% Selenizza increases the high temperature performance grade of the pure binder by one degree and is sufficient to provide similar high temperature performance with the 3% SBS modification, but should be used at a maximum of 7% in terms of low temperature.



## Selenizza doğal asfaltı ile modifiye edilen bitümün geleneksel ve reolojik özelliklerinin incelenmesi

Baha Vural Kök<sup>1\*</sup>, Erkut Yalçın<sup>1</sup>, Mehmet Yılmaz<sup>1</sup>, Barış Büyük<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23100, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Firması, 34235 İstanbul, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Bitümün Selenizza doğal asfaltı ile modifikasyonu
- Selenizza bitümünün saf bitümün düşük ve yüksek sıcaklık performansına olan etkisinin belirlenmesi
- Selenizza ve SBS modifiyeli bağlayıcıların çok gerilmeli sünme toparlanması parametreleri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.06.2021

Kabul: 15.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.954272

### Anahtar Kelimeler:

Doğal asfalt,  
modifikasyon,  
SBS, geleneksel özellikler,  
reolojik özellikler

### ÖZ

Bitümlü karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla genellikle polimer tipi katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ancak bu katkıların üretim miktarlarının sınırlı ve maliyetlerinin yüksek olması, daha düşük maliyetli ve doğal malzemelerin katkı olarak kullanımını gündeme getirmektedir. Bu çalışmada bir doğal asfalt tipi olan Selenizza bitümünün bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası, penetrasyon, viskozite, tekerlek izi parametresi, sünme toparlanması ve düşük sıcaklık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Farklı içerikteki Selenizza bitüm katkı bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık performansı saf ve %3 Stiren-butadien-stiren modifiyeli bağlayıcılar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta Selenizza modifikasyonunun özellikle yüksek sıcaklığa ve yüksek trafik hacmine sahip bölgelerde saf bağlayıcıya göre önemli derecede performans artışı göstereceği, %15 Selenizza ilavesinin saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans seviyesini bir derece artırdığı ve %3 SBS modifikasyonu ile benzer yüksek sıcaklık performansı sunması için yeterli olduğu ancak düşük sıcaklık bakımından en fazla %7 oranında kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

## Investigation of conventional and rheological properties of bitumen modified with Selenizza natural asphalt

### HIGHLIGHTS

- Modification of bitumen with Selenizza natural asphalt
- Determining the effect of Selenizza bitumen on high and low temperature performance of pure bitumen
- Multi stress creep recovery parameters of Selenizza and Styrene-butadiene-styrene modified binders

### Article Info

Research Article

Received: 18.06.2021

Accepted: 15.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.954272

### Keywords:

Natural asphalt,  
modification,  
SBS,  
conventional properties,  
rheological properties

### ABSTRACT

Polymer type additives are generally used to improve the properties of bituminous mixtures. However, the limited production quantities and high costs of these additives bring the use of lower-cost and natural materials as additives. In this study, the effects of Selenizza bitumen, a natural asphalt type, on the softening point, penetration, viscosity, rutting parameter, creep recovery and low temperature properties of bituminous binders were investigated. The low and high temperature performance of Selenizza bitumen-containing binders with different content was compared with pure and 3% Styrene-butadiene-styrene modified binders. As a result, it has been determined that Selenizza modification will show a significant performance increase compared to pure binder especially in regions with high temperature and high traffic volume. It has been determined that the addition of 15% Selenizza increases the high temperature performance level of the pure binder by one degree and is sufficient to provide similar high temperature performance with the 3% SBS modification, but should be used at a maximum of 7% in terms of low temperature.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*bvural@firat.edu.tr, erkutyalcin@firat.edu.tr, mehmetyilmaz@firat.edu.tr, barisbuyuk@istanbulteknik.com / Tel: +90 424 237 0000 / 5418

## 1. Giriş (Introduction)

Artan trafik hacmi ve olumsuz çevre şartları bitümlü karışımların çeşitli katkı maddeleriyle modifiye edilmesini kaçınılmaz bir hale getirmektedir. Bitümlü karışımlar içinde bitüm, ortalama olarak agrega ağırlığına %5 gibi düşük bir oranda kullanılmasına rağmen bitümlü karışımın stabilite, yorulma ve durabilitesinden önemli derecede sorumludur. Bu sebepten dolayı bitümlü karışımların özelliklerini iyileştirmek için genellikle karışım içinde kullanılan bitüm modifiye edilmektedir.

Bitüm katkı maddeleri çok fazla çeşitlilik göstermekle beraber en çok kullanılanları termoplastik elastomerlerdir. Bu katkı maddeleri bitümlü karışımların stabilitesini, soyulma ve yorulma direncini artırmaktadır [1, 2]. Artık asfalt plantlerine kurulan ek tesislerle Stiren-butadien-stiren blok kopolimer (SBS) modifikasyonu yaygın şekilde yapılmaktadır. SBS modifikasyonunun sıcaklık ve trafığe bağlı deformasyonları önleme bakımından başarılı olduğu belirtilmiştir [3-5]. SBS'nin yanında etilen-vinil-asetat, stiren-etilen-butilen-stiren, polietilen, polipropilen ve polivinil klorür gibi polimerlerin bitümlü karışımların yorulma, yüksek sıcaklık direnci ve nem hasarına karşı direncini artırdığı tespit edilmiştir [6-8].

Polimerlerin yanı sıra organik esaslı çinko fosfat bileşiği ile modifiye edilen bitümlü karışımların %3 katkı içeriğinde düşük ve yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir [9]. Nano magnezyum spinel ve kolemanit ile modifiye edilen bitümün tekerlek izine karşı direncini artırdığı ve sıcak iklimli bölgeler için uygun olacağı belirtilmiştir [10]. SBS ile birlikte nanokil kullanımının SBS oranından tasarruf sağladığı, %3SBS+%2 nanokil modifikasyonunun %5SBS modifikasyonu ile benzer mekanik özellikler verdiği belirtilmiştir [11]. Gerek polimer gerekse diğer kimyasal katkı maddelerinin üretim maliyetlerinin yüksek olması ve sınırlı üretimi doğal katkı maddelerinin alternatif olarak değerlendirilmesini gündeme getirmiştir. Bu bağlamda yarı-katı ve katı halde bulunan doğal asfaltlar önemli bir potansiyel olarak görülmektedir. Gilsonite ve Trinidad Göl Asfaltı (TLA) en çok kullanılan doğal asfalt tipleridir [12]. TLA katkılı bitümlerin önemli derecede yüksek tekerlek izi parametresi sunduğu ve yaşlanmaya karşı direnci geliştirdiği tespit edilmiştir [13, 14]. İran kaya asfaltının TLA'ya göre kalıcı deformasyon direncini daha fazla iyileştirdiği belirtilmiştir [15]. Obsidiyen mineraline benzeyen 0 penetrasyonlu 120-175°C erime sıcaklığına sahip ve kolaylıkla parçalanabilen kırılmalı yapıya Gilsonite, yüksek asfalt içeriği, yüksek nitrojen ve moleküler ağırlığı ile karakterize edilmektedir. %4-8 Gilsonite içeren karışımların stabilite ve tekerlek izi direncinin önemli derecede arttığı tespit edilmiştir [16]. Babagoli vd. [17] yaptıkları çalışmada %10 Gilsonite içeren karışımların en yüksek elastik modüle sahip olduklarını ve nem hasarına karşı direnç gösterdiklerini belirtmişlerdir. Milyonlarca yıl içinde ısı ve basınç altında oluşan kaya asfaltları, herhangi bir kimyasal işleme gerek duymayan, bitüm ile yüksek derecede uyumlu çevreci bir doğal asfalt türüdür. Kaya asfaltı ilavesinin rijitliği artırdığı buna karşın düşük sıcaklık davranışını bir miktar olumsuz etkilediği belirtilmiştir [18]. Yapılan çalışmalarda Qingchuan, Buton ve Amerikan kaya asfaltlarının bitümlü karışımların yorulma, yüksek sıcaklık ve soyulmaya karşı direnci artırdığı, düşük sıcaklık bakımından rijitliği artırdığı ayrıca taş-mastik-asfalt kaplama içinde stabilizer görevi gördüğü belirtilmiştir [19-21].

Doğal asfaltlar genellikle ekskavatör kullanılarak açık ocak madenciligi yöntemi ile çıkarılmakta ve rafinasyon işlemi için sadece basit bir ısıtma işlemine tabi tutularak, geleneksel asfalt çimentolarına göre üretim sürecinde herhangi bir kimyasal işleme gereksinim duymadan çok daha az maliyet ve CO<sub>2</sub> salınımı sağlamaktadır. Katı

olarak depolanabilmeleri ve transfer edilebilmeleri lojistik anlamda avantajlar sağlamaktadır.

Bu çalışmada daha önce detaylı olarak çalışılmamış olan bir doğal asfalt türünün (Selenizza) bitümlü bağlayıcı içerisindeki etkisi düşük ve yüksek sıcaklık performansı bakımından incelenmiştir. Farklı Selenizza içerikli modifiyeli bağlayıcıların performansı saf ve %3 SBS katkılı bağlayıcılarla karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal (Material)

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ İzmit rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bitüme ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Doğal asfalt modifikasyonunun etkinliğini değerlendirmek amacıyla SBS modifikasyonu da saf bağlayıcı gibi bir kontrol numunesi olarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan SBS (Kraton D1101) Shell kimyasal firmasından temin edilmiştir. SBS, toz formunda 0.94 gr/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığa ve %31 polistiren içeriğine sahip lineer blok kopolimeridir. Bir doğal asfalt tipi olan Selenizza, İstanbul Teknik İnşaat San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Granüler halde bulunan (Şekil 1) Selenizza'ya ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Selenizza ve SBS katkılı bitümler yüksek kesme hızlı karıştırıcıda (Şekil 2) hazırlanmıştır. 400 gr saf bağlayıcı (bitüm) ısı yalıtımlı kap içerisinde 180°C'ye kadar ısıtılmıştır daha sonra bitüm ağırlığına miktarı belirlenen katkılar 2000 devir/dakika hızda dönen karıştırıcıya ilave edilmiştir. Önceki çalışmalarda [22-24] bu karıştırma prosedürünün polimer modifikasyonunda homojen bir karışım elde etmede uygun olduğu belirtilmiştir. Karıştırma 1 saat devam etmiş ve sonrasında elde edilen modifiye bitümler deneylerde kullanılmak üzere hava almayacak kaplarda muhafaza edilmiştir. Polimer modifiye bitüm hazırlama sırasında sıcaklık ve karıştırma işleminin neden olduğu oksidasyon etkisini elimine etmek amacıyla aynı karıştırma prosedürüne saf bağlayıcı da tabi tutulmuştur.

**Tablo 1.** B 50/70 saf bitümün özellikleri. (Properties of B 50/70 pure bitumen)

| Özellikler               | Standart   | B 50/70 |
|--------------------------|------------|---------|
| Penetrasyon (0,1 mm),    | ASTM D5    | 59,8    |
| Yumuşama noktası (°C)    | ASTM D36   | 53,3    |
| Penetrasyon indeksi (PI) |            | 0,033   |
| Özgül ağırlık            | ASTM D70   | 1,037   |
| Viskozite (cP, 135°C)    | ASTM D4402 | 737     |
| Viskozite (cP, 165°C)    | ASTM D4402 | 225     |
| Doymuşlar (%)            |            | 9,04    |
| Aromatikler (%)          |            | 62,51   |
| Reçineler (%)            |            | 17,03   |
| Asfaltın (%)             |            | 11,42   |

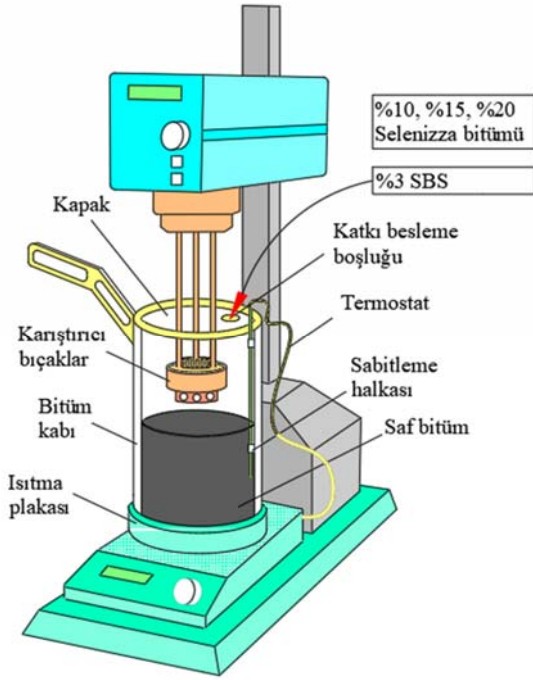
**Tablo 2.** Selenizza bitümü özellikleri. (Properties of Selenizza bitumen)

| Özellikler            | Standart   | B 50/70 |
|-----------------------|------------|---------|
| Penetrasyon (0,1 mm), | ASTM D5    | 1       |
| Yumuşama noktası (°C) | ASTM D36   | 117     |
| Parlama noktası (°C)  | ASTM D92   | >296    |
| Kül içeriği (%)       | EN12697-47 | 16±2    |
| Sülfür içeriği (%)    |            | <5      |
| Nem                   |            | 0       |
| Asfaltın içeriği (%)  | ASTM D6560 | 41      |

Selenizza bitüm ağırlığına %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmış ve sırası ile 10Slz, 15Slz ve 20Slz olarak adlandırılmıştır. SBS ise %3 oranında kullanılmış ve 3SBS olarak adlandırılmıştır.



Şekil 1. Selenizza doğal asfaltı. (Selenizza natural asphalt)



Şekil 2. Laboratuvar tipi yüksek kesme hızlı karıştırıcı (Laboratory type high shear mixer)

### 3. Deneysel Metot (Experimental Method)

#### 3.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri (Conventional Binder Tests)

Çalışmada Selenizza modifikasyonunun etkinliğini belirlemek amacıyla, saf, Selenizza ve SBS modifiyeli bağlayıcılara yumuşama noktası, penetrasyon, dönel viskozite, dinamik kesme reometresi ve giriş eğilme reometresi deneyleri uygulanmıştır.

Bağlayıcıların yumuşama noktaları ASTM D36 standardına göre belirlenmiştir. Her bir bağlayıcı tipinden aynı anda iki test yapıp ortalaması alınmıştır. Penetrasyon deneyi ASTM D5 standardına göre yapılmıştır. Penetrasyon kabı içindeki bir numuneye 6 ayrı yerden iğne batırılarak penetrasyon değerleri tespit edilmiş, bu değerlerden minimum ve maksimum değerlerin dışındaki değerlerin ortalaması dikkate alınmıştır. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri ile Eş.

924

1’de verilen bağıntı ile bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının bir göstergesi olan Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri tespit edilmiştir. Burada  $Pen_{25}$  25°C’deki penetrasyon değerini,  $T_{RB}$  ise yumuşama noktası değeridir. PI değeri -1 ile +1 arasındaki bitümler ısıya karşı normal duyarlılıkta olan bitümler, +1’den büyük değere sahip bitümler ısıya karşı az duyarlı ve PI değerinin -1’den küçük olması ısıya çok duyarlı bitümler olarak değerlendirilmektedir [25].

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

Dönel viskozite deneyi bağlayıcıların akışkanlık karakteristiklerini ve içinde kullanıldıkları bitümlü karışımların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deney ASTM D4402 standardına uygun olarak 135°C ve 165°C’de Brookfield DV-III deney aleti ile yapılmıştır. Bitümlü karışımların hazırlanması, serim ve sıkıştırılması sırasında gösterdiği kolaylığın bir ölçüsü olan işlenebilirlik bakımından 135°C’deki viskozitelerinin 3000 cP’den küçük olması gerekmektedir. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırası ile  $170 \pm 20$  cP ve  $280 \pm 30$  cP viskozitelere karşılık gelen sıcaklıklar olarak tespit edilmiştir.

Bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları ayrıca viskoziteye bağlı duyarlılık (PVN) ile de tespit edilmiştir. Eş. 2 ile tespit edilen PVN değerleri bitümlü bağlayıcı ile kaplamanın düşük sıcaklık çatlakları arasında ampirik bir korelasyondur. Burada  $P_{25}$  25°C’deki penetrasyon, V ise 135°C’deki viskozitedir. PVN, bir bitümlü bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını ve düşük sıcaklıkta çatlama yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. PVN değerlerinin büyük olması bu yeteneğin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir [26].

$$PVN = -1.5 \frac{4.258 - 0.7967 \log P_{25} - \log V}{0.795 - 0.1858 \log P_{25}} \quad (2)$$

#### 3.2. Reolojik Bağlayıcı Deneyleri (Rheological Binder Tests)

Deney orijinal ve kısa süreli yaşlandırılmış (RTFO) bağlayıcılara Bohlin DSR II deney aleti ile AASHTO T315 standardına uygun olarak yapılmıştır. 25 mm paralel plak ve 1 mm plak aralığı kullanılmıştır. Bağlayıcıların kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açıları ( $\delta$ ) 6°C artımlarla 58-82°C aralığında tespit edilmiştir. Bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri ( $G^*/\sin \delta$ ) 10 rad/s (1,59 Hz) kesme hızında tespit edilmiştir. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesi (PG) orijinal bağlayıcılar için 1,0 kPa, yaşlandırılmış bağlayıcılar için 2,2 kPa  $G^*/\sin \delta$  sağlayan sıcaklıklar olarak belirlenmiştir. Deney gerilme kontrollü olarak lineer elastik sınırlar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcılara ayrıca gerilme kontrollü olarak 0,1 – 10 Hz aralığında 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda frekans taraması da yapılmıştır. Frekans taraması ile bağlayıcıların düşük ve yüksek kesme hızındaki davranışları belirlenmiştir.

Çalışmada AASHTO T350 standardına uygun olarak DSR deney aleti ile çoklu gerilme sünme toparlanması (MSCR) deneyi de yapılmıştır. Bu deney bağlayıcıların tekerlek izi parametresini AASHTO T315 standardından farklı olarak belirlemekte ayrıca bağlayıcıların içinde kullanıldıkları bitümlü karışımların hangi sıcaklıkta hangi trafik koşulları için uygun olduğunu belirlemektedir. Bu deneyde tespit edilen sonuçların arazide gerçek olarak tespit edilmiş tekerlek izi değerleri ile yüksek oranda korelasyona sahip olduğu belirtilmiştir [27]. Bunun nedeni ise eski standartta deneyin lineer elastik bölgede yapılması ancak tekerlek izinin non-lineer davranışla ilişkili olmasındandır. Deney ilk önce 0,1 kPa gerilme seviyesinde 20 periyot daha sonra 3,2 kPa gerilme seviyesinde 10 periyot uygulanmaktadır (Şekil 3). Her bir periyot 1 saniye yükleme ve 9 saniye yük boşaltmadan oluşmaktadır. 0,1 kPa gerilme seviyesinin ikinci 10

periyodu ve 3,2 kPa seviyesinin 10 periyodunun her bir periyotlarında hesaplanan geri dönüşümsüz sünme toparlanması ( $J_{nr}$ ) ve geri dönme yüzdesi (R%) değerlerinin ortalaması dikkate alınmaktadır.  $J_{nr}$  ve R% değerlerinin hesaplanması Eş. 3-6'da verilmiştir.

$$J_{nr_{0,1}} = \frac{\sum_{n=1}^{20} [J_{nr_{0,1,n}}]}{10} \quad (3)$$

$$J_{nr_{3,2}} = \frac{\sum_{n=1}^{30} [J_{nr_{3,2,n}}]}{10} \quad (4)$$

$$R_{0,1} = \frac{\sum_{n=1}^{20} [R_{0,1,n}]}{10} \quad (5)$$

$$R_{3,2} = \frac{\sum_{n=1}^{30} [R_{3,2,n}]}{10} \quad (6)$$

Bu yeni sistemde bağlayıcıların sınıflandırılmasında Eş. 7'de verilen bağıntı ile tespit edilen gerilme hassasiyetinin göstergesi olan  $J_{nr_{diff}}$  değerinin %75'ten az olması istenmektedir.

$$J_{nr_{diff}} = \frac{(J_{nr_{3,2}} - J_{nr_{0,1}})}{J_{nr_{0,1}}} \cdot 100 \quad (7)$$

Trafik miktarına göre bağlayıcı standart (S) ağır (H), çok ağır (V) ve oldukça ağır (E) olacak şekilde sınıflandırılmaktadır. Tablo 3'te trafik miktarına bağlı olarak şartname gereksinimleri verilmiştir.

Bağlayıcıların düşük sıcaklık performansını değerlendirmek amacıyla yaşlandırılmamış saf ve katkılı bağlayıcılara AASHTO T313 standardına uygun olarak -25°C'de kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyi uygulanmıştır. BBR deneyi yükleme ile ilgili olmayan düşük sıcaklıktaki büzülmeler neticesinde meydana gelen termal gerilme ile oluşan çatlakların değerlendirilmesi için kullanılmaktadır [28]. Deneyde sünme rijitliği ( $S_t$ ) ve rijitliğin değişimini gösteren sünme oranı (m-value) olarak iki parametre tespit edilmektedir. Eş. 8'e göre belirlenen sünme rijitliği bağıntısında P: Uygulanan sabit yük (N), L: Kiriş uzunluğu (102 mm), b: Kiriş genişliği (12,7 mm), h: Kiriş yüksekliği (6,35 mm) ve  $\delta_t$ : t zamanındaki deformasyonu (mm) göstermektedir.

$$S_t = PL^3 / (4bh^3 \delta_t) \quad (8)$$

Düşük sünme rijitliği ve yüksek sünme oranı değerleri termal gerilmeyi kolaylıkla sönmüleyebilecek esnek davranışa işaret etmektedir. Bu sebepten çalışmada düşük sıcaklıktaki esnek davranışın daha iyi değerlendirilmesi amacıyla  $S_t$  / m-value değerleri ( $\lambda$ ) tespit edilmiştir. Düşük  $\lambda$  değerleri elastik davranışa işaret etmektedir [29].

### 3.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi Demeyi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy Test)

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), bir ortam içindeki kimyasal fonksiyonel grupları belirleme yöntemidir. Kimyasal fonksiyonel gruplar, bileşik içindeki farklı reaksiyonlardan sorumlu olan atom gruplarıdır [30]. Bu çalışmada Bruker Tensor 27 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi kullanılmıştır. Deneyde spektrum aralığı 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  olarak seçilmiştir. Yaşlanmayı değerlendirmek için karboniller (C=O) ve sülfoksit (S=O) oranı belirlenmiştir. C=O ve S=O titreşim bantları, sırasıyla yaklaşık 1700  $\text{cm}^{-1}$  ve 1030  $\text{cm}^{-1}$ 'dir. Yaşlanmayı tespit etmek için kullanılan karbonil ve sülfoksit indeksleri yapılan çalışmalara dayanarak [31, 32] Eş. 9 ve Eş. 10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_{S=O} = A_{1030} / \sum A \quad (9)$$

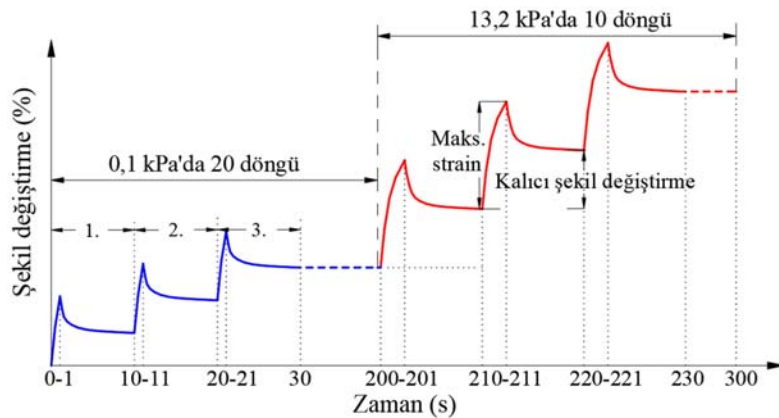
$$I_{C=O} = A_{1700} / \sum A \quad (10)$$

Burada  $A_{1700\text{cm}^{-1}}$  1700  $\text{cm}^{-1}$  merkezli karbonil bandının alanıdır (1650-1750  $\text{cm}^{-1}$  aralığında hesaplanmıştır),  $A_{1030\text{cm}^{-1}}$  1030  $\text{cm}^{-1}$  merkezli sülfoksit bandının alanıdır (980-1080  $\text{cm}^{-1}$  aralığında hesaplanmıştır) ve  $\sum A$  ise 600-2000  $\text{cm}^{-1}$  aralığında spektrum bandının toplam alanıdır.

## 4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

### 4.1. Geleneksel Bağlayıcı Deney Sonuçları (Results of Conventional Binder Tests)

Bağlayıcıların katkı içeriği ile yumuşama noktalarında meydana gelen değişim Şekil 4'te verilmiştir. Selenizza içeriğinin artması ile yumuşama noktası lineer olarak artmaktadır. %10, %15 ve %20

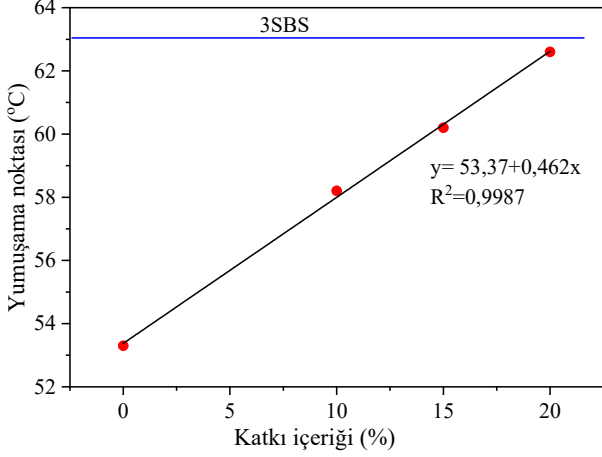


Şekil 3. MSCR testinde şekil değişimi zaman ilişkisi. (Strain-time relation in MSCR test)

Tablo 3. MSCR sisteminde trafiğe bağlı sınıflandırma. (Traffic based classification in MSCR system)

|                        |   |                                       |
|------------------------|---|---------------------------------------|
| Standart trafik, S     | Trafik < 3 milyon (ESDY) V > 70km/h       | $J_{nr_{3,2}} < 4,5 \text{ kPa}^{-1}$ |
| Ağır trafik, H         | Trafik > 3 milyon (ESDY) 20 < V < 70 km/h | $J_{nr_{3,2}} < 2,0 \text{ kPa}^{-1}$ |
| Çok ağır trafik, V     | Trafik > 10 milyon (ESDY) < 20 km/h       | $J_{nr_{3,2}} < 1,0 \text{ kPa}^{-1}$ |
| Oldukça ağır trafik, E | Trafik > 30 milyon (ESDY) V < 20 km/h     | $J_{nr_{3,2}} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$ |

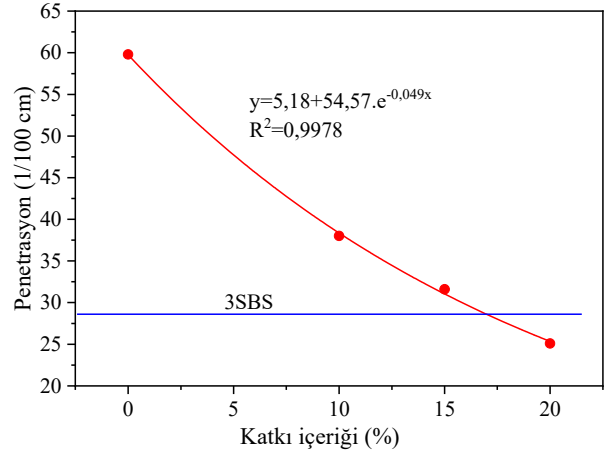
Selenizza içeren bağlayıcı, saf bağlayıcıya göre sırasıyla %9, %13 ve %17 daha yüksek yumuşama noktasına sahiptir. Yüksek yumuşama noktası bağlayıcının daha yüksek sıcaklıklarda visko-elastik özelliğini koruyabileceğine işaret etmektedir. %20 Selenizza içeren bağlayıcı %3 SBS modifikasyonu ile benzer yumuşama noktasına sahiptir.



Şekil 4. Selenizza içeriği ile yumuşama noktasında meydana gelen değişim (The change in softening point with Selenizza content)

Bağlayıcıların katkı içeriği ile penetrasyon değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 5'te verilmiştir. Saf bağlayıcıya Selenizza ilavesi bağlayıcının kıvamını artırarak penetrasyon değerini önemli ölçüde azaltmaktadır. %10, %15 ve %20 Selenizza ilavesi saf bağlayıcının penetrasyonunu sırasıyla %57, %89 ve %138 oranında azaltmaktadır. Bu azalış %3 SBS modifikasyonunda %111 oranında olmaktadır.

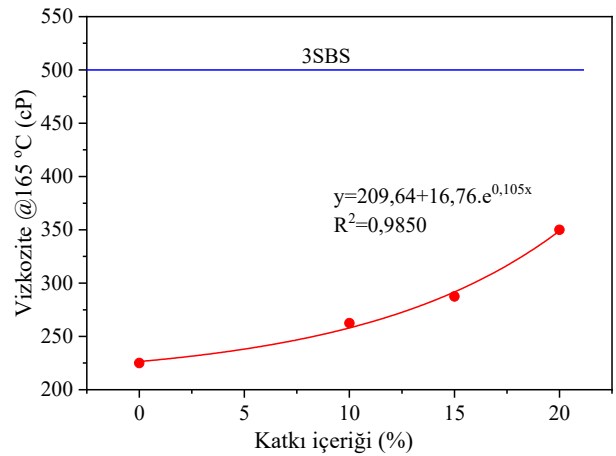
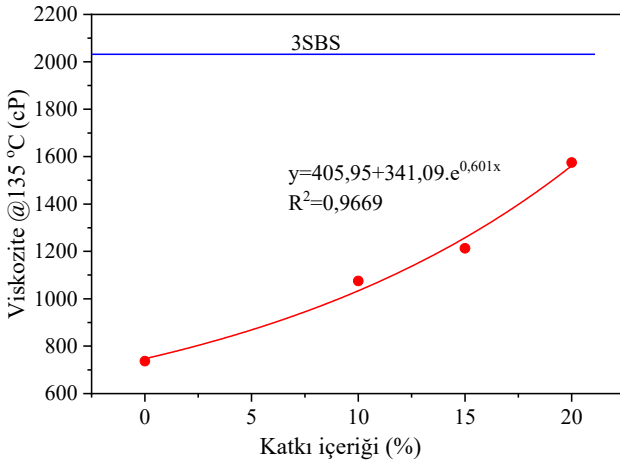
modifikasyonu saf bağlayıcının viskozitesini her iki sıcaklıkta %174 ve %122 oranında artırmaktadır. Viskozitenin yüksek olması yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı direncin yüksek olacağına işaret etmektedir. Diğer taraftan yüksek viskozite bitümlü sıcak karışım (BSK) üretim sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Yumuşama noktası ve penetrasyon bakımından %3 SBS modifikasyonu ile benzer sonuç veren %20 Selenizza modifikasyonu, %3 SBS'den daha düşük viskozite değerleri vererek yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiği bakımından daha olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Her ne kadar SBS modifikasyonunun viskozitesi Selenizza modifikasyonundan oldukça fazla ve dolayısıyla daha az işlenebilir görünse de, Tablo 4'te verilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarına göre, %3 SBS modifikasyonu %20 Selenizza modifikasyonundan 5°C daha düşük %15 Selenizza modifikasyonu ile aynı karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarına sahiptir.



Şekil 5. Selenizza içeriği ile penetrasyon değerlerinde meydana gelen değişim (The change in penetration values with Selenizza content)

Bağlayıcıların 135°C ve 165°C'de katkı içeriği ile viskozitelerinde meydana gelen değişim Şekil 6'da verilmiştir. Selenizza içeriğinin artması ile her iki sıcaklıkta da viskozite üstel olarak artmaktadır. 135°C'de %10, %15 ve %20 Selenizza ilavesi saf bağlayıcının viskozitesini sırasıyla %45, %64 ve %113 oranında artırmaktadır. Bu oranlar 165°C için %16, %27 ve %55 olmaktadır. %3 SBS

Bağlayıcıların penetrasyon ve viskoziteye bağlı ısıya duyarlılıkları Tablo 5'te verilmiştir. Her iki duyarlılığa göre de Selenizza içeriğinin artması bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetini artırmaktadır. Buna



Şekil 6. Selenizza içeriği ile viskozitelerde meydana gelen değişim (The change in viscosities with Selenizza content)

Tablo 4. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları (The mixing and compaction temperatures of binders)

| Bağlayıcılar    | Saf | 10Slz | 15Slz | 20Slz | 3SBS |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|------|
| Karıştırma (°C) | 170 | 173   | 175   | 179   | 175  |
| Sıkıştırma (°C) | 157 | 163   | 165   | 170   | 165  |

karşın SBS modifikasyonu ise ısı duyarlılığını önemli derecede azaltmaktadır. -1 ile +1 arasındaki PI değerlerinin normal bir ısı hassasiyeti olduğu dikkate alındığında bütün bağlayıcıların aynı sınıfta olduğu söylenebilir.

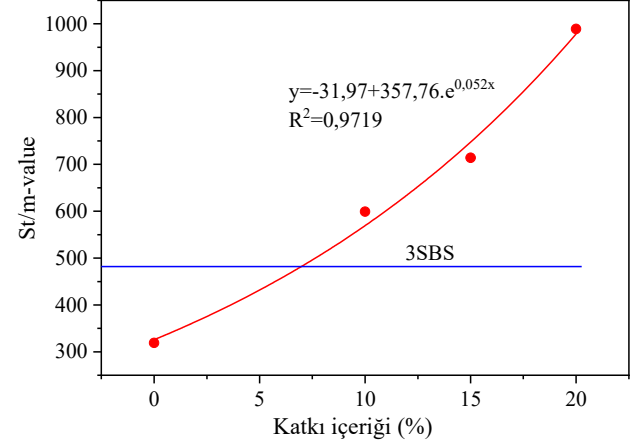
#### 4.2. Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları (Bending Beam Rheometer Test Results)

Deney bağlayıcıların düşük sıcaklık davranışını değerlendirmek için yaşlandırılmamış orijinal bağlayıcılara -25°C'de uygulanmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Sünme rijitliğinin m-value değerine oranındaki değişim ise Şekil 5'te verilmiştir. Saf bağlayıcıya Selenizza ilavesi düşük sıcaklıktaki sünme rijitliğini önemli derecede artırmaktadır. 20Slz bağlayıcısı saf bağlayıcıdan 2,3 kat daha fazla sünme rijitliği ve 2,3 kat daha az deformasyon yapma kapasitesi göstermektedir. Bu oran 3SBS bağlayıcısında 1,2 kat olmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü üzere Selenizza içeriğinin artması düşük sıcaklıkta rijitliği üstel olarak artırmaktadır. Sabit bir yük altında rijitliği üzerinde tutma bakımından 10Slz bağlayıcısı 3SBS bağlayıcısı ile benzer özellik göstermektedir. Ancak sünme rijitliği ve sünme oranı birlikte değerlendirildiğinde %7 Selenizza ilavesi %3 SBS modifikasyonu ile aynı performansı göstermektedir.

#### 4.3. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları (Dynamic Shear Rheometer Test Results)

Bağlayıcıların katkı içeriği ile farklı sıcaklıkta tekerlek izi parametrelerinde meydana gelen değişim Şekil 8'de verilmiştir. Selenizza içeriğinin artması ile bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı önemli derecede iyileşmektedir. Saf bağlayıcıya %10, %15 ve %20 Selenizza ilavesi tekerlek izi parametresini bütün sıcaklıklarda ortalama %47, %100 ve %180 oranında artırmaktadır. SBS modifikasyonunda sıcaklığın artması ile iyileşme oranı artmaktadır. 3SBS bağlayıcısının sahip olduğu performans 58°C'de %17,3 Selenizza ilavesi ile elde edilebilirken, 64°C, 70°C ve 76°C'lerde sırası ile %18,4, %19,3 ve %20,3 Selenizza ilavesi ile elde edilebilmektedir. Bu durum SBS modifikasyonunun sıcaklık artışına

Selenizza modifikasyonuna göre bir miktar daha iyi direnç gösterdiğine işaret etmektedir. Ancak Tablo 7'de verilen yüksek sıcaklık performans seviyelerine göre %15 ve %20 Selenizza modifikasyonu %3 SBS ile aynı performans sınıfındadır. PG 76 yüksek sıcaklık performans sınıfında olan saf bağlayıcı en az %15 Selenizza ilavesi ile bir üst performans sınıfına geçebilmektedir.



**Şekil 7.** Selenizza içeriği ile düşük sıcaklık rijitliğinde meydana gelen değişim  
(The change in low temperature stiffness with Selenizza content)

Şekil 9'da 0,1-10 Hz frekans aralığında bağlayıcıların kompleks kayma modüllerindeki ( $G^*$ ) değişim verilmiştir. Frekansın artması ile bütün sıcaklıklarda kompleks kayma modülleri artmaktadır. 20Slz bağlayıcısı 40°C, 50°C ve 60°C'de en yüksek  $G^*$  değerlerini vermektedir. 70°C'de ise 3SBS bağlayıcısı ile benzer performansa sahiptir. Bu durum daha önce de belirtildiği üzere Selenizza modifikasyonunun 70°C gibi yüksek sıcaklıklardan sonra SBS modifikasyonu kadar kayma gerilmelerine direnç gösteremeyeceğine işaret etmektedir. Ancak kaplamanın maruz kalabileceği sıcaklıklar

**Tablo 5.** Bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları (Temperature susceptibility of binders)

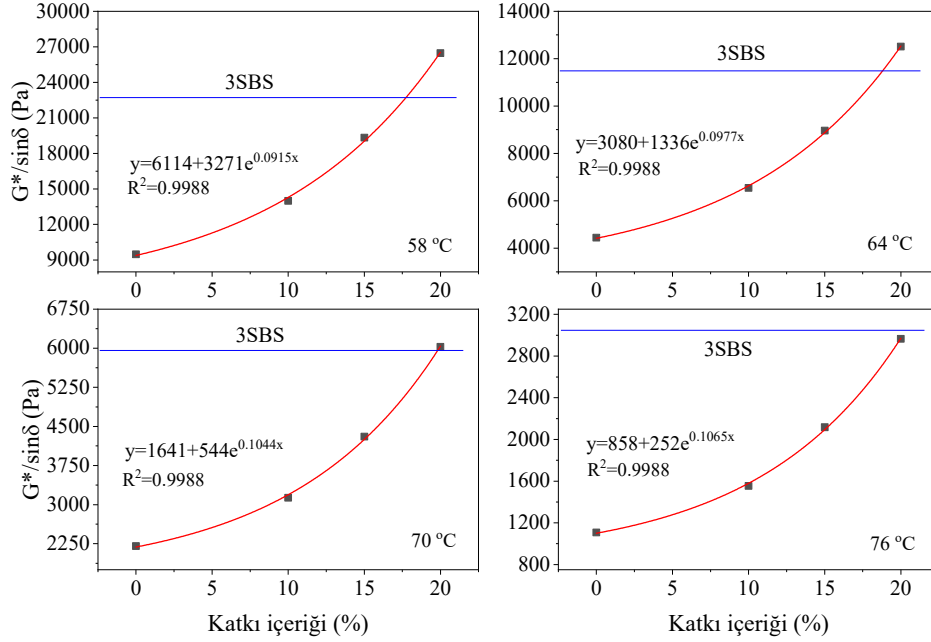
| Bağlayıcılar | Saf   | 10Slz | 15Slz | 20Slz | 3SBS  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PI           | 0,033 | 0,023 | 0,021 | 0,002 | 0,328 |
| PVN          | 0,080 | 0,095 | 0,059 | 0,152 | 0,585 |

**Tablo 6.** BBR deney sonuçları (BBR test results)

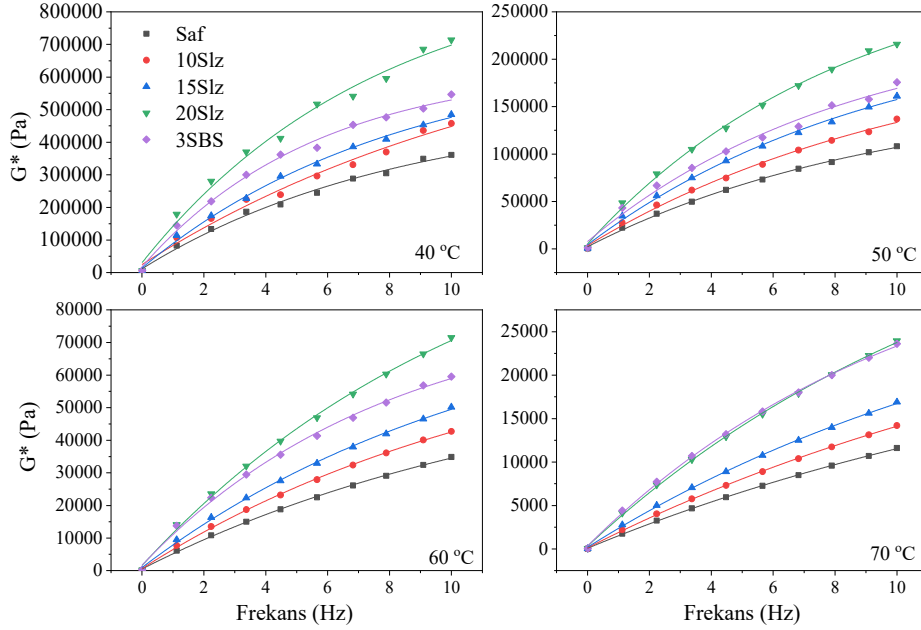
| Bağlayıcılar              | Saf    | 10Slz  | 15Slz  | 20Slz  | 3SBS   |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sünme rijitliği, St (MPa) | 104,85 | 160,51 | 181,73 | 242,78 | 125,72 |
| Sünme oranı, m-value      | 0,3288 | 0,2679 | 0,2545 | 0,2455 | 0,2605 |
| Deformasyon (mm)          | 0,7642 | 0,4447 | 0,4445 | 0,3336 | 0,6461 |

**Tablo 7.** Bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri ve yüksek sıcaklık performans seviyeleri  
(The rutting parameter and high temperature performance grade of binders)

| Bağlayıcılar | Yaşlanma durumu | Deney sıcaklıkları (°C) |       |      |      |      | PG | Gerçek PG |
|--------------|-----------------|-------------------------|-------|------|------|------|----|-----------|
|              |                 | 58                      | 64    | 70   | 76   | 82   |    |           |
| Saf          | Orijinal        | 9471                    | 4443  | 2204 | 1108 |      | 76 | 76,7      |
|              | RTFO            |                         |       |      | 4160 |      |    |           |
| 10Slz        | Orijinal        | 13993                   | 6547  | 3132 | 1555 |      | 76 | 79,5      |
|              | RTFO            |                         |       |      | 7049 |      |    |           |
| 15Slz        | Orijinal        | 19324                   | 8957  | 4304 | 2117 | 1072 | 82 | 82,2      |
|              | RTFO            |                         |       |      |      | 5609 |    |           |
| 20Slz        | Orijinal        | 26463                   | 12506 | 6026 | 2965 | 1513 | 82 | 84,8      |
|              | RTFO            |                         |       |      |      | 7894 |    |           |
| 3SBS         | Orijinal        | 22707                   | 11494 | 5900 | 3041 | 1524 | 82 | 85,6      |
|              | RTFO            |                         |       |      |      | 6248 |    |           |



Şekil 8. Bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinde meydana gelen değişim (The change in rutting parameter of binders)

Şekil 9.  $G^*$  değerlerinin farklı sıcaklıklarda frekans ile değişimi (Variation of  $G^*$  values at different temperatures with frequency)

dikkate alındığında, 60°C ve 5 Hz yükleme hızında 20Slz bağlayıcısı 3SBS bağlayıcısından %13, saf bağlayıcıdan %108 daha yüksek  $G^*$  değeri vermektedir ve bu oranlar frekansın artması ile artmaktadır. Bu durum da yüksek hızda seyreden trafik altında özellikle 15Slz ve 20Slz bağlayıcılarının esneklik kabiliyetinin daha fazla olacağına işaret etmektedir.

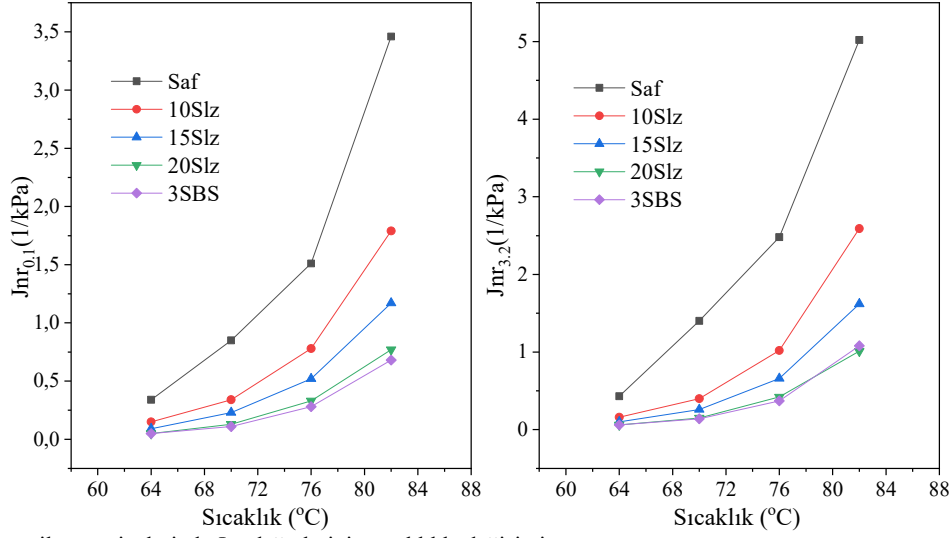
#### 4.4. Çok Gerilmeli Sünme Toparlanması (MSCR) Deney Sonuçları (Multi Stress Creep Recovery Test Results)

Şekil 10'da 0,1 ve 3,2 kPa gerilme seviyesinde bağlayıcıların sünme toparlanmasında sıcaklıkla meydana gelen değişim verilmiştir. Her iki gerilme seviyesinde de sıcaklığın artışı ile  $J_{nr}$  değerleri önemli ölçüde

artmaktadır. Bu artış eğilimi Selenizza içeriğinin artması ile azalmaktadır. 20Slz ve 3SBS bağlayıcıları benzer performans göstermektedir. Bu bağlayıcılar 3,2 kPa gerilme seviyesinde saf bağlayıcıya göre 5 kat daha az  $J_{nr}$  değeri vererek tekerlek izine karşı önemli derecede direnç göstermişlerdir. Şekil 11'de 3,2 kPa gerilme seviyesinde  $J_{nr}$  değerinin Selenizza içeriği ile değişimi verilmiştir. Selenizza içeriğinin artması ile  $J_{nr}$  değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. 20Slz bağlayıcısı 64°C-82°C sıcak aralığında saf bağlayıcıya göre 5-9 kat daha düşük  $J_{nr}$  değeri vermektedir.

Bağlayıcıların AASHTO-T350 standardına göre farklı sıcaklıklardaki trafik sınıflandırması Tablo 8'de verilmiştir. Saf bağlayıcının T315 standardına göre belirlenmiş olan PG 76 seviyesinin standart (S) trafik





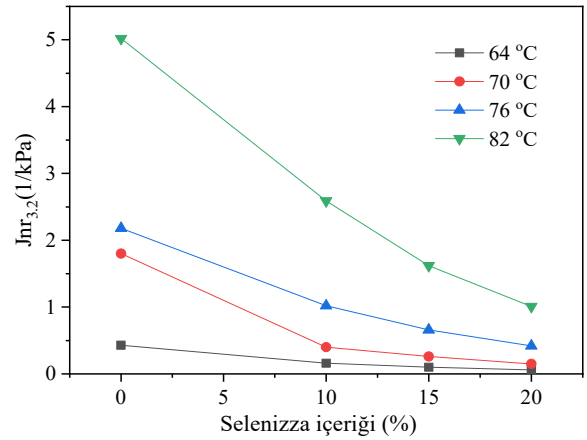
Şekil 10. Farklı gerilme seviyelerinde Jnr değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Variation of Jnr values with temperature at different stress levels)

Tablo 8. Bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki trafik sınıflandırması (Traffic classification of binder at different temperature)

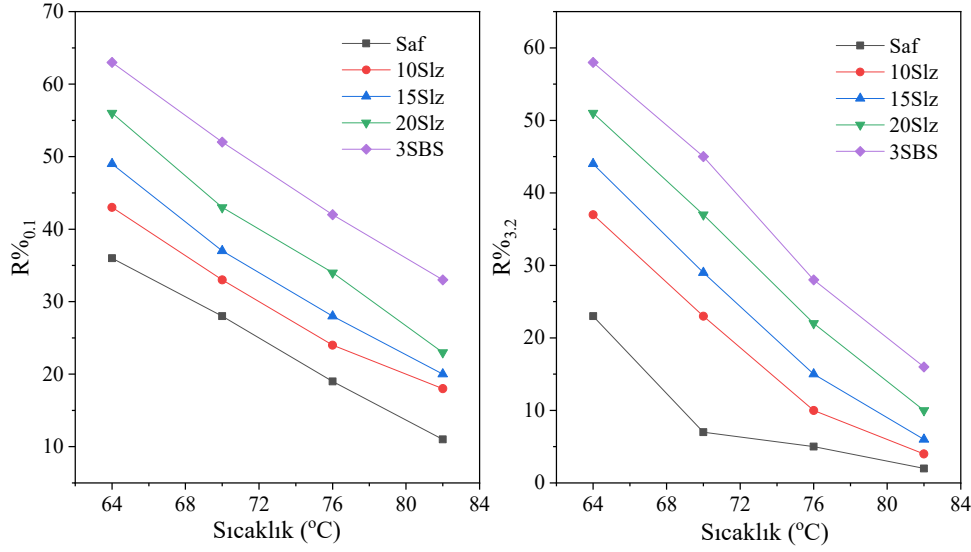
| Bağlayıcılar | Test sıcaklığı (°C) | G*/sin $\phi$ (Pa)<br>AASHTO T315 | Jnr <sub>0,1</sub> (1/kPa) | Jnr <sub>3,2</sub> (1/kPa) | Jnr <sub>diff</sub> (%) | PG<br>AASHTO T350 |
|--------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| Saf          | 64                  | 4443                              | 0,34                       | 0,43                       | 29                      | PG64-E            |
|              | 70                  | 2204                              | 0,85                       | 1,80                       | 65                      | PG70-H            |
|              | 76                  | 1108                              | 1,51                       | 2,18                       | 64                      | PG76-S            |
| 10Slz        | 64                  | 6547                              | 0,15                       | 0,16                       | 11                      | PG64-E            |
|              | 70                  | 3132                              | 0,34                       | 0,40                       | 19                      | PG70-E            |
|              | 76                  | 1555                              | 0,78                       | 1,02                       | 31                      | PG76-H            |
| 15Slz        | 64                  | 8957                              | 0,09                       | 0,10                       | 9                       | PG64-E            |
|              | 70                  | 4304                              | 0,23                       | 0,26                       | 15                      | PG70-E            |
|              | 76                  | 2117                              | 0,52                       | 0,66                       | 26                      | PG76-V            |
|              | 82                  | 1072                              | 1,17                       | 1,62                       | 38                      | PG82-H            |
| 20Slz        | 64                  | 12506                             | 0,05                       | 0,06                       | 13                      | PG64-E            |
|              | 70                  | 6026                              | 0,13                       | 0,15                       | 13                      | PG70-E            |
|              | 76                  | 2965                              | 0,33                       | 0,42                       | 27                      | PG76-E            |
|              | 82                  | 1513                              | 0,77                       | 1,01                       | 32                      | PG82-H            |
| 3SBS         | 64                  | 11494                             | 0,05                       | 0,06                       | 13                      | PG64-E            |
|              | 70                  | 5900                              | 0,11                       | 0,14                       | 22                      | PG70-E            |
|              | 76                  | 3041                              | 0,28                       | 0,37                       | 33                      | PG76-E            |
|              | 82                  | 1524                              | 0,68                       | 1,08a                      | 58                      | PG82-H            |

için uygun olduğu tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı 64°C'de oldukça ağır (E), 70°C'de ise ağır (H) trafik koşulları için uygundur. Saf bağlayıcıya %10, %15 ve %20 Selenizza ilavesi 64°C'deki trafik sınıflandırmasını değiştirmezken 64°C'den yüksek sıcaklıklarda bağlayıcıyı daha ağır trafik koşulları için uygun hale getirebilmektedir. %10 Selenizza ilavesi saf bağlayıcıyı 76°C'de standart trafik koşullarından ağır trafik koşullarına uygun hale getirmektedir. %15 ve %20 Selenizza ilavesi bu sıcaklıkta bağlayıcıyı sırasıyla çok ağır ve oldukça ağır trafik koşullarına elverişli hale getirmektedir. Ayrıca 15Slz ve 20Slz bağlayıcıları 82°C'de de ağır trafik koşullarına dirençli bağlayıcılardır. Selenizza ilavesi ağır trafik koşulları altında ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı önemli derecede direnç artışı sağlamaktadır. Şekil 12'de bağlayıcıların farklı gerilme seviyelerindeki toparlanma yüzdeleri (R%) verilmiştir. Her iki gerilme seviyesinde de bağlayıcıların esnekliklerinin sıcaklık artışı ile önemli derecede azaldığı görülmektedir. 3,2 kPa gerilme seviyesinde sıcaklığın 64°C'den 82°C'ye yükselmesi saf bağlayıcının R% değerlerini %11,5 azaltırken bu azalış 10Slz, 15Slz ve 20Slz bağlayıcılarında sırasıyla %9,2, %7,3 ve %5,1 olmaktadır. Selenizza ilavesi sıcaklık artışı ile oluşan esneklik kaybına direnç gösterebilmektedir. Diğer bir ifade ile Selenizza modifikasyonu yüksek sıcaklıklarda esnek davranışını koruyabilmektedir. 3SBS bağlayıcısı bütün sıcaklıklarda en fazla esnek davranış gösteren bağlayıcı olmuştur. Şekil 13'te 3,2 kPa

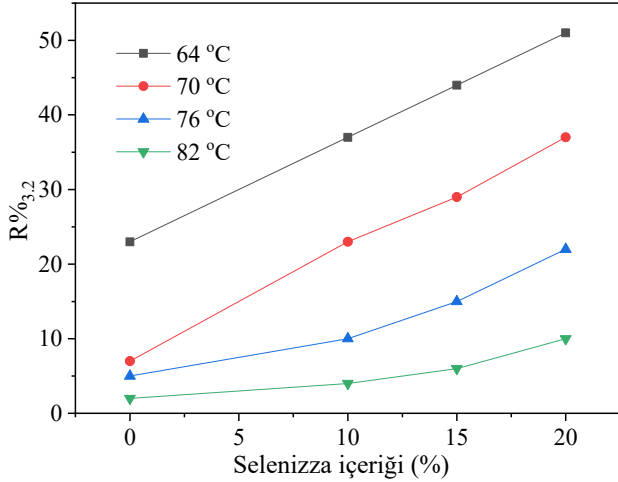
gerilme seviyesinde Selenizza içeriği ile R% değerlerinde meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 11. 3,2 kPa gerilme seviyesinde Jnr değerlerinin Selenizza içeriği ile değişimi (Variation of Jnr values with Selenizza content at 3.2 kPa stress level)



Şekil 12. Farklı gerilme seviyelerinde R% değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Variation of R% values with temperature at different stress levels)



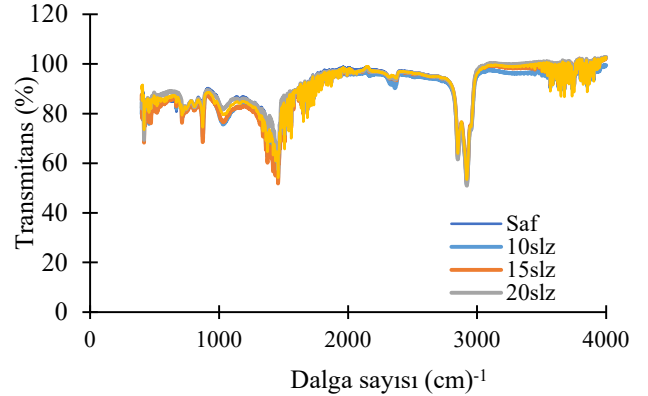
Şekil 13. R%<sub>3,2</sub> değerlerinin Selenizza içeriği ile değişimi (Variation of R%<sub>3,2</sub> values with Selenizza content)

64°C'de Selenizza ilavesinin artması ile R% değerleri lineer olarak artarken sıcaklık artışı ile bu doğrusallık bozulmaktadır. Özellikle 70°C'den daha yüksek sıcaklıklarda %15 ve %20 Selenizza ilavesi esnekliği daha iyi koruyarak R% değerlerinin daha yüksek olmasına ve dolayısıyla 64°C'deki lineerliğin bozulmasına neden olmuştur. %15 ve %20 Selenizza ilavesi saf bağlayıcının esnekliğini 70°C'de sırasıyla 4,1 ve 5,2 kat artırmaktadır. Bu artış %3 SBS modifikasyonunda 6,4 kat olmaktadır. Yüksek R% değerlerine sahip olan bağlayıcı, içinde kullanıldığı bitümlü karışımda her tekerlek geçişinde oluşacak toplam şekil değiştirmenin büyük kısmının geri kazanılacağına ve daha az tekerlek izi oluşacağına işaret etmektedir.

#### 4.5. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi Demey Sonuçları (Fourier Transform Infrared Spectroscopy Demey Results)

Saf ve modifiye bağlayıcıların FTIR sonuçları Şekil 14'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bağlayıcıların karbonil grubuna (C=O) karşılık gelen 1700 cm<sup>-1</sup> pik noktasının ve sülfoksit grubuna (S=O) karşılık gelen 1030 cm<sup>-1</sup> pik noktasının fazla değişmediği belirlenmiştir. Kalitatif analiz, modifiyeli bağlayıcıların çok çeşitli aromatik hidrokarbonlardan oluştuğunu ortaya koymaktadır. Tüm bağlayıcıların absorpsiyon spektrumlarının üst üste çıktığı

görülmektedir. Her iki katkı tipi içerisinde en fazla değişikliğin Selenizza modifiyeli bağlayıcılarda olduğu belirlenmiştir.



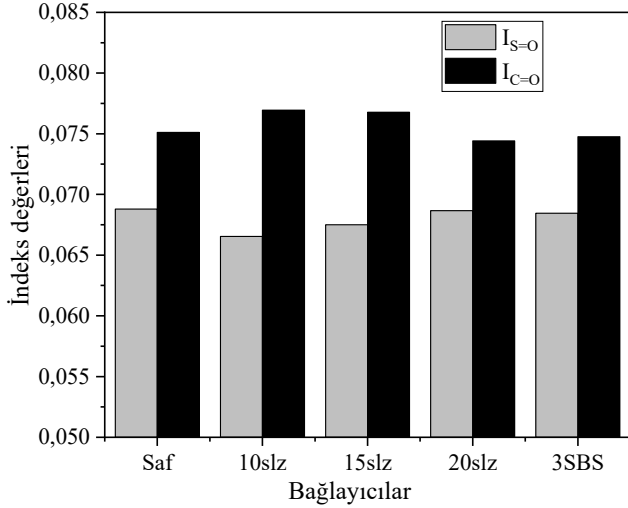
Şekil 14. Bağlayıcıların FTIR sonuçları (FTIR results of binders)

Bağlayıcıların kısa süreli yaşlanmadan sonra sahip oldukları C=O ve S=O indeksleri Şekil 15'te verilmiştir. Burada modifiye bağlayıcıların birbirleriyle benzer indeks değerlerine sahip olduğu en düşük ve en yüksek değerler arasında %3'lük bir farkın olduğu dolayısıyla yaşlanmadan benzer şekilde etkilendiği tespit edilmiştir.

#### 5 Simgeler (Symbols)

|                     |  |
|---------------------|--|
| AASHTO              | :Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Ulaştırma Birliği |
| ASTM                | :Amerikan Test ve Malzeme Kurumu                       |
| BBR                 | :Kiriş Eğilme Reometresi                               |
| DSR                 | :Dinamik Kesme Reometresi                              |
| ESDY                | :Eşdeğer Standart Dingil Yüğü                          |
| FTIR                | :Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi          |
| Jnr                 | :Geri Dönüşümsüz Sünme Toparlanması                    |
| Jnr <sub>diff</sub> | :Gerilme Hassasiyeti                                   |
| MSCR                | :Çok Gerilmeli Sünme Toparlanması                      |
| PI                  | :Penetrasyon İndeksi                                   |
| PVN                 | :Penetrasyon Viskozite Numarası                        |
| R%                  | :Geri Dönme Yüzdesi                                    |
| RTFO                | :Dönel İnce Film Etüvü                                 |
| SBS                 | :Stiren-butadien-stiren                                |

$S_t$  :Sünme Rijitliği  
 TLA :Trinidad Göl Asfaltı  
 TÜPRAŞ :Türkiye Petrol Rafineleri Anonim Şirketi  
 $\square$  :Faz Açısı  
 $G^*$  :Kompleks Kayma Modülü  
 $G^*/\sin \square$  :Tekerlek İzi Parametresi



**Şekil 15.** Bağlayıcıların  $I_{S=0}$  ve  $I_{C=0}$  indeks sonuçları  
(The  $I_{S=0}$  ve  $I_{C=0}$  index results of binders)

## 6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada bir doğal asfalt tipi olan Selenizza bitümü ilavesinin saf bitümün geleneksel ve reolojik özelliklerine etkisi araştırılmış, ayrıca %3 SBS modifikasyonu ile karşılaştırılmıştır.

Selenizza içeriğinin artması ile yumuşama noktası lineer olarak artmıştır. %20 Selenizza modifikasyonu %3 SBS modifikasyonu ile benzer sonuç verirken, penetrasyonu SBS modifikasyonundan daha fazla azaltmaktadır. %15 Selenizza modifikasyonu visko-elastik davranışını saf bağlayıcıya göre 7°C daha fazla sıcaklığa kadar koruyabilmektedir. Selenizza içeriğinin artması ile viskozite üstel olarak artmaktadır. %20 Selenizza ilavesi işlenebilirlik bakımından bir sorun teşkil etmemekle birlikte 135°C'deki viskozitesi %3 SBS modifikasyonundan %30 daha düşüktür. %15 Selenizza modifikasyonu %3 SBS modifikasyonu ile aynı, saf bağlayıcıya göre ise yaklaşık 5°C daha fazla karıştırma-sıkıştırma sıcaklığı gerektirmektedir. Selenizza modifikasyonu saf bağlayıcıdan bir miktar iyi, SBS modifikasyonundan bir miktar kötü sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. Ancak saf, Selenizza ve SBS modifiyeli bütün bağlayıcılar sıcaklık değişimlerine karşı normal düzeyde bir hassasiyet göstermektedirler.

Selenizza içeriğinin artması ile bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı önemli derecede iyileşmektedir. %3 SBS katkılı bağlayıcının sahip olduğu performans, sıcaklığa göre %17,3 - %20,3 Selenizza ilavesi ile elde edilebilirken %15 Selenizza ilavesi %3 SBS modifikasyonu ile aynı yüksek sıcaklık performans sınıfındadır. %10 Selenizza ilavesi 70°C'nin üstünde saf bağlayıcıyı çok ağır trafik koşulları için uygun hale getirmektedir. Selenizza modifikasyonu yüksek sıcaklıklarda esnek davranışını koruyabilerek tekerlek izi oluşumuna karşı önemli bir direnç göstermektedir. Selenizza içeriğinin artması ile düşük sıcaklıktaki rijitlik önemli derecede artmaktadır. SBS modifikasyonu Selenizza modifikasyonuna göre düşük sıcaklıkta daha esnek bir davranış göstermektedir. %3 SBS modifikasyonu ile benzer düşük sıcaklık performansı %7'den daha az Selenizza modifikasyonu ile elde edilebilmektedir. Selenizza

modifiyeli bağlayıcılar SBS modifikasyonu ile benzer yaşlanma karakteristiği göstermektedir.

Bütün deneyler birlikte değerlendirildiğinde Selenizza modifikasyonunun özellikle yüksek sıcaklığa ve yüksek trafik hacmine sahip bölgelerde saf bağlayıcıya göre önemli derecede performans artışı göstereceği, %15 Selenizza ilavesinin saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans seviyesini bir derecede artırmak ve %3 SBS modifikasyonu ile benzer yüksek sıcaklık performansı sunması için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

## Kaynaklar (References)

- Tayfur S., Ozen H., Aksoy A., Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Constr Build Mater*, 21, 328–37, 2007.
- Kök B.V., Yılmaz M., Determining the high temperature performance grade and workability of styrene-butadiene-styrene modified bituminous binders according to superpave system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 (4), 811–819, 2008.
- Zhu J., Birgisson B., Kringos N., Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *Eur Polym J*, 54, 18–38, 2014.
- Mota R.V., Kuchiishi A.K., Takahashi M.M., de Souza G., Camargo F.F., Bessa I.S., et al., Effect of binder rheology and aggregate gradation on the permanent deformation of asphalt mixtures, *Int J Civ Eng* 2021.
- Al-Adham K., Baig M.G., Wahhab HA-A., Prediction of dynamic modulus for elastomer-modified asphalt concrete mixes at desert environment., *Arab J Sci Eng*, 44, 4141–4149, 2019.
- Isacson U., Lu X., Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, *J Mater Sci*, 34, 3737–45, 1999.
- Aglan H., Othman A., Figueroa L., Rollings R., Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transp Res Rec*, 178–86, 1993.
- Yildirim Y., Polymer modified asphalt binders, *Constr Build Mater*, 21, 66–72, 2007.
- Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Improvement of bitumen and bituminous mixtures performance properties with organic based zincphosphate compound, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 459–466, 2012.
- 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), 939–952, 2018.
- Ayıldız D., İskender E., Aksoy A., Investigation of optimum composition ratio for SBS / nanoclay / bitumen nanocomposites in stone mastic asphalt mixtures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 1847–1862, 2021.
- Liao M.C., Chen J.S., Airey G.D., Wang S.J., Rheological behavior of bitumen mixed with Trinidad lake asphalt, *Constr Build Mater*, 66, 361–7, 2014.
- He R., Zheng S., Chen H., Kuang D., Investigation of the physical and rheological properties of Trinidad lake asphalt modified bitumen, *Constr Build Mater*, 203, 734–9, 2019.
- Li R., Wang P., Xue B., Pei J., Experimental study on aging properties and modification mechanism of Trinidad lake asphalt modified bitumen, *Constr Build Mater*, 101, 878–83, 2015.
- Huang W.T., Xu G.Y., Anti-rutting performance analysis of asphalt mixture with different natural asphalt, *Appl Mech Mater*, 529, 256–9, 2014.
- Jahanian H.R., Shafabakhsh G., Divandari H., Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite, *Constr Build Mater*, 131, 156–64, 2017.
- Babagoli R., Hasaninia M., Mohammad N.N., Laboratory evaluation of the effect of gilsonite on the performance of stone matrix asphalt mixtures, *Road Mater Pavement Des*, 16, 889–906, 2015.
- Zhong K., Yang X., Luo S., Performance evaluation of petroleum bitumen binders and mixtures modified by natural rock asphalt from Xinjiang China, *Constr Build Mater*, 154, 623–31, 2017.
- Shi X., Cai L., Xu W., Fan J., Wang X., Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen, *Constr Build Mater*, 161, 705–14, 2018.

20. Zou G., Wu C., Evaluation of rheological properties and field applications of buton rock asphalt, *J Test Eval*, 43, 20130205, 2015.
21. Yalçın E., Çeloğlu M.E., Akpolat M., Yamaç Ö.E., Alataş T., Kök B.V., et al. Effect of gilsonite use on storage stability of styrene-butadiene-styrene modified bitumen, *Period Polytech Civ Eng*, 63 (3), 833-844, 2019.
22. Kök B.V., Yılmaz M., Geçkil A., Evaluation of low-temperature and elastic properties of crumb rubber– and SBS-modified bitumen and mixtures, *J Mater Civ Eng*, 25, 257–65, 2013.
23. Kök B.V., Çolak H., Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt, *Constr Build Mater*, 25, 3204–12, 2011.
24. Kaya D., Topal A., Gupta J., McNally T., Aging effects on the composition and thermal properties of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen, *Constr Build Mater*, 235, 117450, 2020.
25. Hunter R.N., Self A., Read J., *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth. Westminster/London: ICE Publishing; 2015.
26. Meltzer R., Fiorini Y., Horstman R., Moore I., Batik A., McLeod N., Asphalt Cements: Pen-vis number and its application to moduli of stiffness, *J Test Eval*, 4, 275, 1976.
27. Federal Highway Administration Asphalt Pavement Technology Program. The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. USDepartment Transp 2011. [www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf](http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf).
28. Marasteanu M.O., Li X., Clyne T.R., Voller V.R., Timm D.H., Newcomb D.E., Low temperature cracking of asphalt concrete pavements. Minnesota Department of Transportation Office of Research Services, MN/RC – 2004-23, 2004.
29. Liu S., Cao W., Fang J., Shang S., Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt, *Constr Build Mater*, 23, 2701–8, 2009.
30. Hou X., Lv S., Chen Z., Xiao F., Applications of Fourier transform infrared spectroscopy technologies on asphalt materials, *Measurement*, 121, 304–16, 2018.
31. Lamontagne J., Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens, *Fuel*, 80, 483–8, 2001.
32. Yao H., Dai Q., You Z., Fourier Transform Infrared Spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders, *Constr Build Mater*, 101, 1078–87, 2015.