

## Nanosilika Modifiyeli Bağlayıcıların Tekerlek İzi Direnci ve Sıcaklık Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

Mustafa AKPOLAT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye  
<sup>\*1</sup> mustafaakpolat@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 28/12/2022;

Kabul/Accepted: 22/02/2023)

**Öz:** Bu çalışmada, Nanosilika (NS) katkısının bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi ve sıcaklık hassasiyetine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda saf ve 3 farklı orandaki (%2, %4 ve %6) nanosilika modifiyeli bağlayıcılar üzerine penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi uygulanmıştır. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini belirlemek için geleneksel deney sonuçlarından yararlanılarak penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite sayısı (PVN) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, saf bağlayıcının nanosilika ile modifiye edilmesiyle bağlayıcının kıvamında azalma ve viskozitesinde artış sağlanmıştır. Bu sayede sıcaklık hassasiyeti daha düşük modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Ayrıca MSCR deney sonuçlarına göre nanosilika modifiyesinin bütün sıcaklıklarda daha düşük Jnr değerleri vererek bağlayıcının tekerlek izi parametresini geliştirdiği daha ağır taşıt trafiklerine cevap verebileceği ve yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilceği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Nanosilika, modifikasyon, sıcaklık hassasiyeti, tekerlek izi

### Determination of Rutting and Temperature Susceptibility of Nanosilica Modified Binders

**Abstract:** In this study, the effect of Nanosilica (NS) additive on rutting and temperature susceptibility of bituminous binders was evaluated. In this context, penetration, softening point, viscosity and multiple stress creep recovery (MSCR) tests were applied on pure and nanosilica modified binders in 3 different ratios (2%, 4% and 6%). In order to determine the temperature sensitivity of pure and NS modified binders, the penetration index (PI) and penetration-viscosity number (PVN) were determined by using conventional test results. According to the results obtained, the consistency of the binder decreased and the viscosity increased by modifying the pure binder with nanosilica. In this way, modified binders with lower temperature sensitivity were obtained. In addition, according to the MSCR test results, it was determined that the nanosilica modifier can respond to heavier vehicle traffic, where the binder improves the rutting parameter by giving lower Jnr values at all temperatures and can be used at high service temperatures.

**Key words:** Nanosilica, modification, temperature susceptibility, rutting

#### 1. Giriş

Stiren-bütadien-stiren (SBS) ve stiren bütadien kauçuğu (SBR) gibi polimerler, asfalt bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek için son 40 yıldır asfalt bağlayıcı modifikasyonunda kullanılmaktadır. Bu polimerlerin tümü bitüm özelliklerini bir dereceye kadar iyileştirmesine rağmen, yüksek maliyet, yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesindeki problemler gibi dezavantajları vardır [1]. Bu nedenle, asfalt modifikasyonu için nanomalzemelerin kullanımı, bu dezavantajların üstesinden gelmek ve asfalt kaplama performansını daha da iyileştirmek için araştırılmaktadır ve çeşitli polimerler ve öğütülmüş araç lastiği (CR)'nin yanı sıra, nanomalzemeler, birçok alanda olduğu gibi bitüm modifikasyonunda da son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlamıştır.

Nanomalzemeler, inşaat mühendisliği malzemeleri, özellikle asfalt ve asfalt karışımlarının yaşlanma ve yapışma özelliklerini artıran kaplama inşaat malzemeleri gibi malzemelerin performansını iyileştirmek için yaşamın sayısız uygulamasında kullanımlarıyla bilinmektedir [2,3].

Nanomalzemelerin malzeme performansını iyileştirme yeteneğinin arkasındaki nedenin, geniş yüzey alanı, yeterli dispersiyon kabiliyeti, kimyasal saflık, yüksek absorpsiyon kabiliyeti ve mükemmel stabilite olduğu da belirtilmektedir. [4,5]. Nanosilika (NS), beton karışımlarının performansını ve elastomerlerin reolojik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan nanomalzemelerden biridir [6].

Silika parçacıklarının şekli ve boyutu, asfalt bağlayıcıda kullanım için oldukça arzu edilir çünkü temas yüzey alanı, geleneksel dolgu maddelerinkinden çok daha yüksektir ve nispeten daha yüksek polariteye ve kimyasal

\* Sorumlu yazar: [mustafaakpolat@munzur.edu.tr](mailto:mustafaakpolat@munzur.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7070-3217

olarak aktif yüzeye sahiptir [7,8]. Yusoff ve diğerlerinin (2014) yaptığı çalışmada, polimer modifiyeli bağlayıcıların performans özelliklerini iyileştirmek için %4 NS eklenmesinin optimum içerik olduğunu ve oksidatif yaşlanmaya duyarlılığı belirgin bir şekilde azalttığını belirtmişlerdir [6]. Fini ve ark. [8]'nın katkı malzemesi olarak NS parçacıklarını kullandığı, asfaltın reolojik ve oksidatif yaşlanma direnci üzerindeki etkisini araştırmak için yaptığı çalışmada, NS parçacıklarının, elastikiyeti ve depolama stabilitesini artırarak bağlayıcının reolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ve tekerlek izi performansını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, NS partiküllerinin geniş yüzey alanı nedeniyle, modifiye edilmiş bağlayıcıların reolojik yaşlanma indeksi, modifiye edilmemiş olana kıyasla kayda değer bir gelişme gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan bir diğer çalışmada da, NS ile modifiye edilmiş asfaltın tekerlek izi ve yaşlanma performansındaki iyileşme ifade edilmiştir [3].

Tekerlek izi sıcak asfalt karışımlarında en sık rastlanan bozulma türüdür. Türkiye gibi ağır taşıt trafiğine sahip ve bölgesel olarak sıcak yerlerde tekerlek izi oluşumu sıklıkla görülür. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında meydana gelen deformasyonlardan, trafik tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyonların birikmesinden, yeterli sıkışmanın sağlanamamasından veya bitüm miktarının fazla olmasından dolayı oluşabileceği belirtilmektedir [9].

Saf bitüme bağlayıcı ağırlığınca %2 ila %4 oranında NS ilavesinin tekerlek izini neredeyse yarı yarıya azaltabileceği belirtilmiştir [6]. Öğütülmüş araç lastiği (CR) modifiyeli bağlayıcılara NS ilavesi ile bağlayıcıların reolojik özelliklerindeki değişimin incelendiği çalışmada, NS'nin CR modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir [10].

NS ve palmiye yağı ile modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmada, penetrasyonun azaldığı ve yumuşama noktası ve dinamik viskoziteyi artırarak sıcaklık hassasiyetini iyileştirildiği belirtilmiştir. Ayrıca NS partiküllerinin tekerlek izi parametresini ( $G^*/\sin\delta$ ) artırırken ve biyo-asfaltın yaşlanma hassasiyetini ve sünme uyumunu (Jnr) azaltarak bağlayıcının esnekliğini arttırdığı belirtilmiştir [11].

Samsudin ve diğerleri [12], saf bağlayıcıya %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nanosilika ilave ederek MSCR deneyi ile bağlayıcıların tekerlek izi dirençlerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre nanosilikanın sünme geri dönme (R) yüzdesini artırırken Jnr değerini azaltarak daha elastik davranış sergilediğini ve tekerlek izi direncini geliştirdiğini belirlemişlerdir.

Taherkhani ve Afrooz [13], nano-silika içeren asfalt karışımının sünme davranışını araştırmıştır. Sonuçta, artan nano-silika içeriği ile akış sayısının (flow number) arttığını ve kararlı hal gerinim hızının (steady-state strain rate) azaldığını belirtmiştir. Bunun da kalıcı deformasyona karşı direnci artıracakını ifade etmiştir.

Zghair ve ekibi, 2%, 4%, and 6% oranlarında Nanosilika ile modifiye edilmiş bağlayıcıların reolojik özelliklerini incelemiştir ve nanosilikanın artan yüzdesiyle bağlayıcının rijitliğinin arttığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığını belirtmişlerdir [14].

Rizai ve ekibi yaptığı çalışmalarda SBS modifiyeli bağlayıcılara nanosilika ilavesinin tekerlek izi direncini geliştirebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, SBS/nanosilika modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların yüksek akış sayısı verdiğini bununda yüksek sıcaklıklardaki performansının geliştiğine işaret ettiğini ifade etmişlerdir [15,16].

Yapılan çalışmada Fume Silika'nın bitüm modifikasyonunda tek başına ve Crumb rubber (CR) ile birlikte kullanılmasının bağlayıcının geleneksel ve reolojik özelliklerine etkisi araştırılmış ve SBS modifiyeli bağlayıcı ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bitüm ağırlığınca %6 CR modifikasyonu içerisinde %1.5 Fume silika kullanılması ile yumuşama noktasında diğer bağlayıcılara göre daha fazla artış sağlandığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, bağlayıcının kıvamının arttığı, kompleks modül değerlerinin artarak tekerlek izine karşı daha dirençli olduğu ve daha esnek davranış sergileyerek düşük sıcaklık parametrelerini iyileştirdiği belirtilmiştir [17].

Farklı iki bitüm sınıfına %2 ve %4 oranlarında NS ilavesinin bağlayıcının tekerlek izi parametresini arttırdığı, lineer genlik taraması sonucuna göre yorulma parametresi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca NS modifikasyonunun yüksek kaplama sıcaklıkları ve ağır taşıt trafiği koşullarında kullanımının uygun olacağı ifade edilmiştir [18].

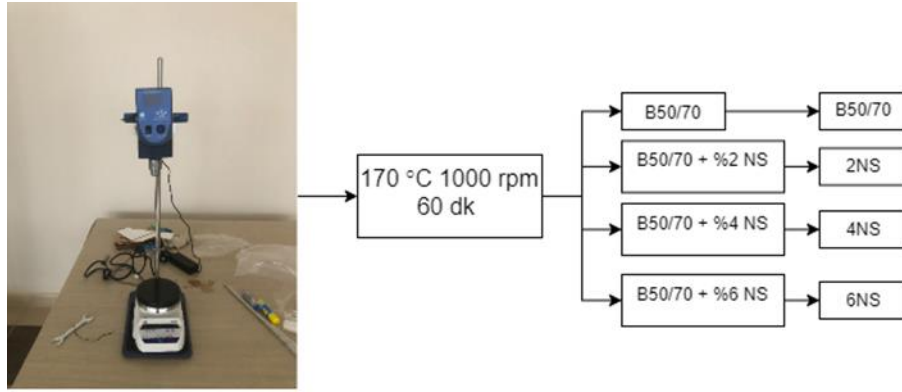
Sonuç olarak yapılan literatür çalışması sonucunda yazarlar bağlayıcı ağırlığınca %0.1 ile %7 arasında farklı oranlarda nanosilika katkısı kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda nanosilika modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi direncini, yorulma ömrünü, yüzde geri dönme değerlerini ve sünme uyumunu geliştirdiği belirlenmiştir [7,19–23]

Bu çalışmada saf ve 3 farklı oranda (%2, %4 ve %6) nanosilika (NS-Aerosol 150) modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi ile sıcaklık hassasiyeti, viskozite ve penetrasyon deneyi ile penetrasyon-viskozite sayısı (PVN) ve MSCR deneyi ile sünme geri dönme (%R) ve sünme uyumu (Jnr) tespit edilecektir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan mekanik karıştırıcı, katkı oranları ve kısaltmaları Şekil 1’de verilmiştir. Katkı malzemesi olarak nanosilika çeşidi olan Aerosil 150 katkısı özellikleri de Tablo 1’de verilmiştir. Bütün modifiye bağlayıcılar TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen ve ülkemizde aşınma tabakası için sıklıkla kullanılan B 50/70 penetrasyon sınıfında saf bağlayıcılar ile Şekil 1’de görülen mekanik karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan nanosilikanın (NS) kullanım oranları da Şekil 1’de görülmektedir. Modifiye bağlayıcılar 1000 devir/dk karıştırma hızında, 170 °C sıcaklıkta 1 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Ayrıca bağlayıcılar arasında karıştırma sırasındaki yaşlanmayı elemine etmek için saf bağlayıcılar da aynı karıştırma prosedürüne tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Mekanik karıştırıcı, katkı oranları ve kısaltmalar

Tablo 1. Nanosilika (NS) katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri

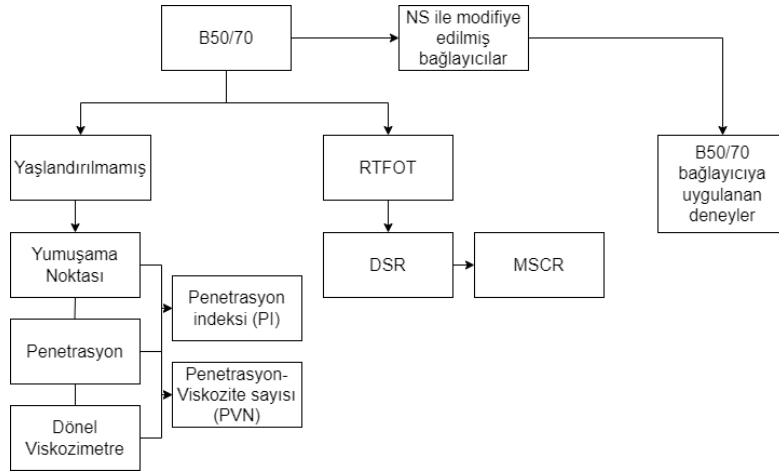
Özellikler	Birim	Değer
Özgül yüzey alanı	m <sup>2</sup> /g	150±15
Ortalama tane büyüklüğü	nm	14
Sıkıştırılmış yoğunluk	g/l	50
Nem	% wt.	≤ 1.5
Ateşleme kaybı	% wt.	≤ 1.0
pH (%4 çözelti içinde)		3.7 - 4.7
SiO <sub>2</sub>	% wt.	≥ 99.8

### 2.2 Metod

Çalışmada kullanılan deneysel plan Tablo 2’de verilirken deney dizaynı da Şekil 2’de verilmiştir.

Table 2. Deneysel plan

Deney adı	Standart	Ekipman	Test sıcaklık aralığı (°C)	Yaşlanma durumu
Penetrasyon	AASHTO T49	Penetrometre	25	Yaşlandırılmamış
Yumuşama noktası	AASHTO T53			Yaşlandırılmamış
Viskozite	AASHTO T 316	Dönel viskozimetre	135 ve 165	Yaşlandırılmamış
Çoklu gerilme sünme geri dönme (MSCR)	AASHTO T350	DSR	58-76	RTFOT



Şekil 2. Deneysel dizayn

### 2.2.1 Penetrasyon deneyi

Bitüm sınıflandırılmasında kullanılan geleneksel bir test yöntemi olan penetrasyon deneyi aynı zaman bağlayıcının kıvamını belirlemek için de kullanılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır [24]. Penetrasyon değeri kıvam ile ters orantılıdır yani penetrasyon değeri arttıkça bağlayıcının kıvamı azalmaktadır.

### 2.2.2 Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla AASHTO T53 standardında belirtildiği gibi bitüm doldurulmuş standart halkanın üzerine bırakılan bilyenin sıcaklık artışıyla aşağıya doğru düşmesi ve bu düşüşün 2.5 cm olduğu andaki sıcaklık olarak tanımlanmaktadır [25]. Deney 5 °C’de başlatılarak sıcaklık her dakikada 5 °C artacak şekilde cihaz ayarlanır. Bağlayıcıların yumuşama noktalarının artması ile tekerlek izinde iyileşme sağlandığı bilinmektedir.

### 2.2.3 Viskozite deneyi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Deney AASHTO T316 standardına göre yapılmaktadır [26]. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. 135°C’deki viskozite değerinin 3 Pa.s’yi aşmaması istenir.

### 2.2.4 MSCR deneyi

MSCR deneyi, AASHTO T350 [27] standardına uygun olarak AASHTO T315 standardına göre hazırlanmış saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine 25 mm plak kullanılarak RTFOT kalıntısı üzerine yapılmıştır. Test, 0,1 kPa gerilme seviyesinde 20 döngü 3,2 kPa gerilme seviyesinde 10 döngü olacak şekilde 58-76 °C (6 °C’e arttırılarak) sıcaklık arasında yapılmıştır. Her döngü 1 sn kayma gerilmesi 9 sn geri kazanımdan oluşmaktadır. Bağlayıcının davranışını karakterize etmek için lineer viskoelastik bölgedeki davranış 0.1 kPa gerilim seviyesi ile sağlanırken lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranış 3.2 kPa gerilme seviyesi ile sağlanmaktadır.

Deney sonucunda iki parametre elde edilmektedir. Bunlardan birincisi kalıcı sünme uyumu (Jnr) diğeri ise yüzde geri dönme (R)değeridir. Asfalt bağlayıcılar için ortalama yüzde geri dönme değerleri sırasıyla 0.1 kPa (R0.1) ve 3.2(R3.2) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Denklem 1 ve 2’ye göre hesaplanmaktadır [28].

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [\epsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (2)$$

$\varepsilon_r$  N dögü sayısında sırasıyla 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönmeyi ifade etmektedir. R parametresi bağlayıcı içerisinde katkı varlığının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Jnr parametresinin tekerlek izi oluşumu ile iyi bir uyumunun olduğu belirtilmektedir [29][30]. Standartta dikkate alınan farklı trafik yükleme kategorileri standart (S), ağır (H), çok ağır (V) ve aşırı ağır (E) olarak verilmiştir. 0.1 kPa (Jnr0.1) ve 3.2 kPa (Jnr3.2) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Denklem 3 ve 4'te, Jnr<sub>diff</sub> değerinin hesaplanması ise Denklem 5'te verilmiştir.

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [Jnr(0.1, N)]}{10} \quad (3)$$

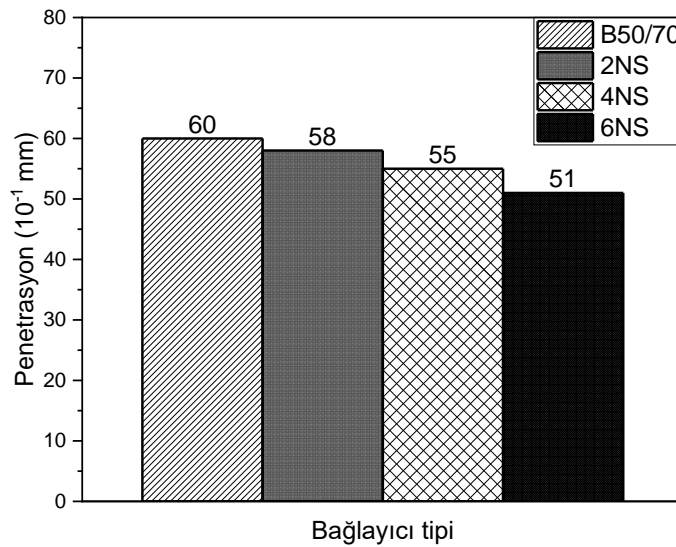
$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [Jnr(3.2, N)]}{10} \quad (4)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \leq 75 \quad (5)$$

### 3. Deneysel Sonuçları

#### 3.1 Penetrasyon deneysel sonuçları

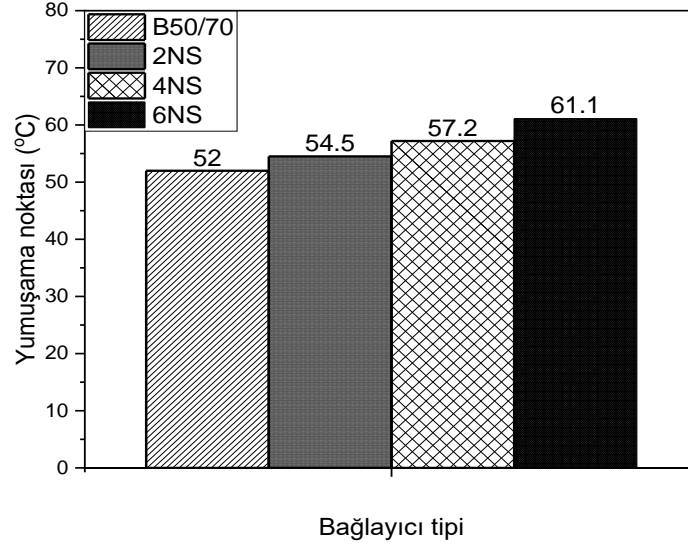
Şekil 3'te saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon değerleri verilmiştir. Şekle göre nanosilika oranı arttıkça bağlayıcının penetrasyon değerleri düşmektedir. Yani bağlayıcının kıvamı azalmaktadır. Bu azalma %2, %4 ve %6 NS içeriğinde saf bağlayıcıya göre sırasıyla %3.3, %8.3 ve %15 olmaktadır. Penetrasyon değerlerindeki düşüş bitümün bir miktar sertleştiği ifade etmektedir. Buda yumuşama noktasında artış ve tekerlek izinde daha iyi bir direnç sağlayabileceğini işaret etmektedir.



Şekil 3. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon değerleri

### 3.2 Yumuşama noktası deney sonuçları

B50/70 ve NS modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktasındaki değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'e göre, saf bağlayıcı içerisine NS ilave ile yumuşama noktasında artış görülmüştür. Bu artış saf bağlayıcıya göre %2, %4 ve %6 nanosilika modifiyesi ile 1.05, 1.1 ve 1.18 kat olmaktadır. Buda nanosilika katkısının bağlayıcının yumuşama noktasını arttırarak daha yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilirliğini ifade etmektedir.



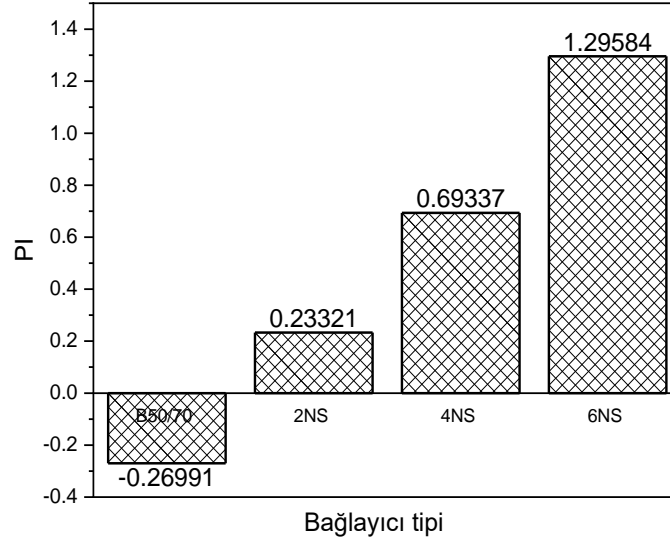
Şekil 4. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

Isıya karşı duyarlılık, bağlayıcıları kıyaslarken önemli bir parametredir. Bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetinin bilinmesi kaplamanın sıcaklık değişiminden nasıl etkileneceği hakkında bilgi sağlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu parametre bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden faydalanılarak hesaplanmaktadır ve Penetrasyon indeksi (PI) olarak adlandırılmaktadır. Bağlayıcılar için PI değerinin genellikle -2 ile +2 değeri arasında olması istenmektedir. Ancak PI değeri ne kadar yüksekse ısıya karşı duyarlılık o kadar azdır. PI değerleri 6 ve 7 nolu denklemler yardımıyla bulunmaktadır.

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (6)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (7)$$

Burada  $P_{25}$  penetrasyon ve  $T_{YN}$  ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. Bu çalışmada penetrasyon ve yumuşama noktasına göre elde edilen PI değerleri Şekil 5'te görülmektedir. Şekle göre saf bağlayıcıya NS ilavesi bağlayıcının PI değerlerinde artışa neden olmuştur. Saf bağlayıcıya %2, %4 ve %6 nanosilika ilavesi ile PI değerlerinde 0.87, 2.57 ve 4.8 kat artış sağlanmıştır. Bu artış bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının azaldığını ifade etmektedir. Yani bağlayıcının daha yüksek servis sıcaklıklarında hizmet verebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PI değerleri

### 3.3 Dönel viskozimetre deney sonuçları

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların viskozite ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'e göre, saf bağlayıcıya NS ilavesi ile viskozite de önemli oranda artış görülmüştür. Bu artış %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılarda sırasıyla %68, %171 ve %382 olmaktadır. Ayrıca 6NS bağlayıcısı şartname kriteri olan 3000 cP değerini aşmaktadır. Buda işlenebilirlik açısından bu bağlayıcının şartname kriterlerini sağlamadığını göstermektedir. Viskozite değerine göre nanosilika katkısının optimum oranının %4 olduğu görülmektedir. Ayrıca nanosilika katkısıyla artan viskoziteden dolayı saf bağlayıcıya göre karıştırma sıcaklıklarında yaklaşık olarak 3, 4 ve 5 °C, sıkıştırma sıcaklıklarında ise 6, 9 ve 11 °C artış meydana gelmiştir.

Tablo 3. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların viskozite değerleri ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı Tipi	Viskozite (cP)		Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
	135 °C	165 °C		
B50/70	750	212.5	166.2-168.5	159.5-162.9
2NS	1263	312.5	168.8-170.1	165.0-166.9
4NS	2038	525	171.6-172.4	169.2-169.9
6NS	3613	887.5	172.7-173.1	171.4-171.7

McLeod (1989), tarafından 25 °C'deki penetrasyona ve 135 °C'deki viskoziteye bağlı olan PI'e alternatif olarak bir penetrasyon-viskozite numarası (PVN) geliştirilmiştir[31]. PVN değeri genellikle - 2 ve 0.5 aralığındadır. Yüksek PVN düşük sıcaklık hassasiyeti gösterirken düşük PVN yüksek sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. PVN değeri Denklem 8'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır ([32][33]). Denklem 8'deki LogL ve LogM değerleri Denklem 8(a) verilen formüle göre belirlenmektedir.

$$PVN = \frac{\text{Log}L - \text{Log}X}{\text{Log}L - \text{Log}M} \times (-1.5) \quad (8)$$

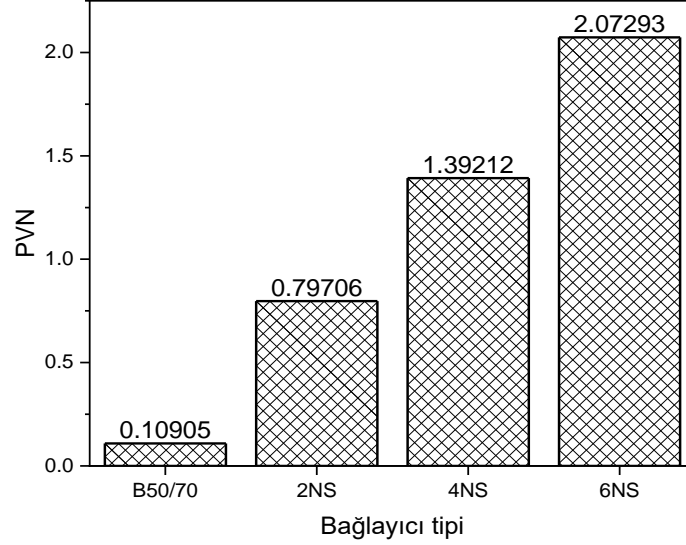
$$\text{Log}L = 4.2580 - 0.79674 \times \log P$$

$$\text{Log}M = 3.46289 - 0.61094 \times \log P \quad (8.a)$$

Burada; X = 135°C'deki viskozite, L = PVN=0,0 için 135°C'deki viskozite, M = PVN=1,5 için 135°C'deki viskozite ve P = 25°C'deki penetrasyon, 1/10 mm olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 6'da saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PVN değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf bağlayıcı içerisinde nanosilika ilavesi ile PVN değerlerinde önemli oranda artış sağlanmıştır. Bu artış %2, %4 ve %6 NS

modifiyeli bağlayıcılarda saf bağlayıcıya göre sırasıyla 7.3, 12.7 ve 19 kat olmaktadır. PVN'deki artış bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermektedir.

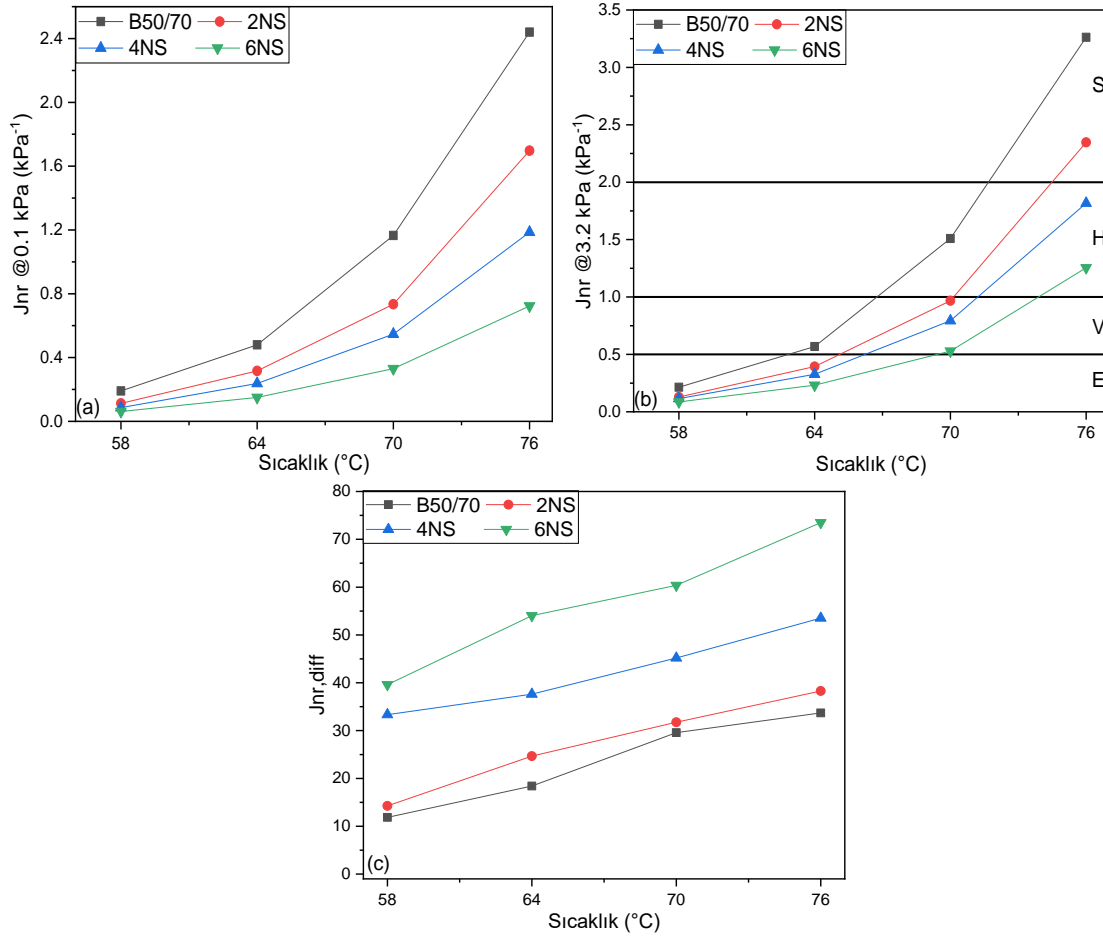


Şekil 6. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PVN değerleri

### 3.4 MSCR deney sonuçları

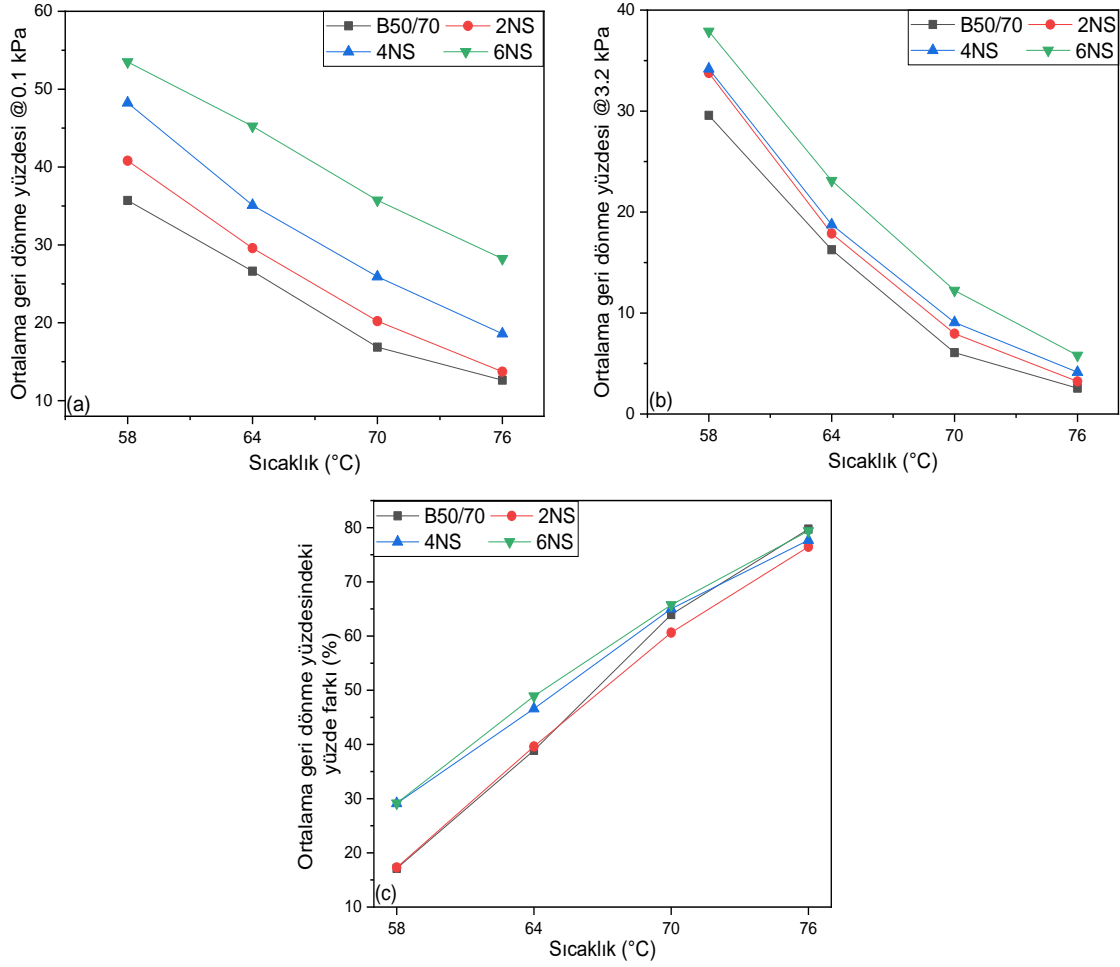
Şekil 7'de farklı sıcaklıklarda uygulanan MSCR testinin 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki ve bu gerilme seviyeleri arasındaki yüzdesel farkların ( $J_{nr,diff}$ ) sonuçları verilmiştir. Şekil 7(a) ve Şekil 7(b)'de görüldüğü üzere her iki yük seviyesinde de saf bağlayıcı içerisinde nanosilika kullanılmasıyla  $J_{nr}$  değerlerinde önemli oranda düşüş görülmüştür. Buda modifiyeli bağlayıcıların her sıcaklıkta saf bağlayıcıya göre tekerlek izine karşı daha dirençli olacağını bir göstergesidir. 76 °C'de 3.2 kPa'daki  $J_{nr}$  değerlerine göre %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre sırasıyla %28, %44 ve %61 daha düşük  $J_{nr}$  değeri verirken, bu oran 70 °C'de %37, %47 ve %65 olmaktadır. Bu değişim 0.1 kPa yük seviyesinde ise bütün sıcaklıklarda yaklaşık olarak %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcı için sırasıyla yaklaşık olarak %35, %52 ve %70 çıkmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere NS modifiyeli bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha düşük yük seviyelerinde tekerlek izine karşı daha iyi davranış sergilemektedir. Şekil 7(c)'de görüldüğü üzere saf ve NS modifiyeli bağlayıcılar bütün sıcaklıklarda MSCR protokolünün ikinci kriteri olan  $J_{nr,diff} \leq 75$  değerini sağlamıştır. Şekilde görüleceği üzere sıcaklık artışıyla saf ve modifiyeli bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerleri lineer bir şekilde artmaktadır. 58 °C ile 76 °C'de değerlendirildiğinde saf bağlayıcının  $J_{nr,diff}$  değerindeki artış 2.9 kat iken modifiyeli bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerindeki artışı sırasıyla 2.7, 1.6 ve 1.8 kat olmaktadır. Yani modifiye bağlayıcıların iki yük arasındaki (0.1 kPa ve 3.2 kPa) oranı daha düşük çıktığından sıcaklık artışından daha az etkilendiği ve yüksek sıcaklıklarda saf bağlayıcıya göre daha iyi direnç göstereceği belirlenmiştir.





Şekil 7. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların MSCR test sonuçları a)  $J_{nr3.2}$  b)  $J_{nr0.1}$  c)  $J_{nr,diff}$

Şekil 8'de saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki ortalama yüzde geri dönemleri ve bu iki gerilme seviyesindeki geri dönme yüzdeleri arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Şekil 8(a)'da görüldüğü üzere sıcaklık artışıyla 0.1 kPa gerilme seviyesindeki ortalama geri dönme yüzdeleri lineer olarak azalmaktadır. %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcıların 58 C'de ve 0.1 kPa'daki geri dönme yüzdeleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1.14, 1.35 ve 1.50 kat daha fazla olurken 70 C'de sırasıyla 1.19, 1.47 ve 2.24 kat daha fazla olmaktadır. Bu da 0.1 kPa yük seviyesinde sıcaklık artışıyla modifiyeli bağlayıcıların daha esnek davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 8(b)'de ise 3.2 kPa yük seviyesindeki geri dönme yüzdeleri değerlendirildiğinde 58 C'de saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcılar sırasıyla 1.14, 1.25 ve 1.28 kat 70 C'de ise sırasıyla 1.31, 1.49 ve 2.01 kat daha fazla geri dönme yüzdesi vermiştir. Yine burada da yük ve sıcaklık artışıyla modifiye bağlayıcıların daha esnek davranış sergilediği görülmektedir. Şekil 8 (c)'ye göre sıcaklık artışıyla 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerinde arasındaki fark saf ve modifiyeli bağlayıcılarda lineer olarak artmıştır. Bu artış 58 °C ile 76 °C sıcaklık arasında %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar için 1.20 kat iken saf ve %2 NS modifiyeli bağlayıcılarda 1.25 kat olmuştur. Yani %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar gerilme artışından en az etkilenen bağlayıcılar olmuştur.



Şekil 8. Farklı sıcaklıklardaki MSCR test sonuçları a)  $R_{0.1}$  b)  $R_{3.2}$  c) 3.2 kPa ve 0.1 kPa'daki ortalama geri dönme yüzdesindeki yüzde farkı

Tablo 4. MSCR deney sonuçlarından elde edilen Jnr değerleri

Bağlayıcı Tipi	Sıcaklık ©	Jnr (0.1 kPa, $kPa^{-1}$ )	Jnr (3.2 kPa, $kPa^{-1}$ )
B50/70	58	0.1909	0.2136
	64	0.4799	0.5683
	70	1.1652	1.5098
	76	2.4401	3.2622
2NS	58	0.1127	0.1287
	64	0.3161	0.3941
	70	0.7345	0.9678
	76	1.6974	2.3473
4NS	58	0.086	0.1147
	64	0.2373	0.3266
	70	0.5465	0.7934
	76	1.1861	1.8173
6NS	58	0.0621	0.0866
	64	0.1502	0.2313
	70	0.33	0.5292
	76	0.7231	1.2545

#### 4. Sonuçlar

Farklı oranlardaki nanosilika katkısının bitümlü bağlayıcının kıvamına, sıcaklık hassasiyetine ve tekerlek izi direncine olan etkisinin B50/70 bitüm sınıfı için araştırıldığı bu çalışmada:

- NS oranı arttıkça kıvamın azaldığı ve yumuşama noktasının arttığı belirlenmiştir.
- NS oranı arttıkça viskozite değerlerinin arttığı ve %6 NS içeriğinde 3 Pa.s sınır şartının aşılarak işlenebilirlik açısından olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- NS oranı arttıkça hem PI hem de PVN değerlerinde saf bağlayıcıya göre artış görüldükçe sıcaklık hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir.
- MSCR deney sonucuna göre nanosilika oranı arttıkça Jnr değerlerinde bütün sıcaklıklarda saf bağlayıcıya göre artış görülmüştür. Buda NS modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi direncinin saf bağlayıcıya göre daha yüksek olduğunu ve MSCR şartname kriterlerine göre yüksek sıcaklıklarda ağır taşıt trafiğine daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Yine MSCR deney sonuçlarına göre bağlayıcının NS ile modifiye edilmesi ile geri dönme yüzdelerinde (R) artış sağlanmıştır ve daha elastik bir davranış sergilediği görülmüştür.
- %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcıların gerilme artışından en az etkilenen bağlayıcılar olduğu belirlenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Ouyang C, Wang S, Zhang Y, Zhang Y. Improving the Aging Resistance of Asphalt by Addition of Zinc Dialkyldithiophosphate. *Fuel* 2006; 85(7–8): 1060–1066.
- [2] Moghadas Nejad F, Tanzadeh R, Tanzadeh J, Hamed GH. Investigating the Effect of Nanoparticles on the Rutting Behaviour of Hot-Mix Asphalt. *Int. J. Pavement Eng.* 2016; 17(4): 353–362.
- [3] Al-Sabaei AM, Napiah MB, Sutanto MH, Alaloul WS, Zoorob SE, Usman A. Influence of Nanosilica Particles on the High-Temperature Performance of Waste Denim Fibre-Modified Bitumen. *Int. J. Pavement Eng.* 2022; 23(2): 207–220.
- [4] Bala N, Napiah M, Kamaruddin I. Nanosilica Composite Asphalt Mixtures Performance-Based Design and Optimisation Using Response Surface Methodology. *Int. J. Pavement Eng.* 2020; 21(1): 29–40.
- [5] Kong D, Du X, Wei S, Zhang H, Yang Y, Shah SP. Influence of Nano-Silica Agglomeration on Microstructure and Properties of the Hardened Cement-Based Materials. *Constr. Build. Mater.* 2012; 37: 707–715.
- [6] Yusoff NIM, Breem AAS, Alattug HNM, Hamim A, Ahmad J. The Effects of Moisture Susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2014; 72: 139–147.
- [7] Yao H, You Z, Li L, Lee CH, Wingard D, Yap YK, Shi X, Goh SW. Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt Modified with Nanosilica. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013; 25(11): 1619–1630.
- [8] Fini EH, Hajikarimi P, Rahi M, Moghadas Nejad F. Physicochemical, Rheological, and Oxidative Aging Characteristics of Asphalt Binder in the Presence of Mesoporous Silica Nanoparticles. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016; 28(2).
- [9] Uluaylı M. Türkiye’de Asfalt Beton Kaplamalar ve Alternatifleri. *Karayolları Tek. Bülten* 1976.
- [10] Han L, Zheng M, Li J, Li Y, Zhu Y, Ma Q. Effect of Nano Silica and Pretreated Rubber on the Properties of Terminal Blend Crumb Rubber Modified Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2017; 157: 277–291.
- [11] Al-Sabaei AM, Napiah M, Sutanto M, Alaloul W, Md Yusoff NI, Imran Khan M, Modibbo Saeed S. Physicochemical, Rheological and Microstructural Properties of Nano-Silica Modified Bio-Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2021; 297: 123772.
- [12] Samsudin MS, Arshad AK, Masri KA, Rawi SN, Hassan HM, Mustakim NH. Characterisation of Colloidal Nanosilica Modified Asphalt Binder. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021; 1874(1).
- [13] Taherkhani H, Afroozi S. Investigating the Creep Properties of Asphaltic Concrete Containing Nano-Silica. *Sādhanā* 2018; 43(2): 24.
- [14] Zghair HH, Jony H, Hassan M. Rheological Characteristics of Nano Silica Modified Asphalt Binder Material. In: 2019 Int. Eng. Conf. IEEE 2019; 79–84.
- [15] Rezaei S, Ziari H, Nowbakht S. Low Temperature Functional Analysis of Bitumen Modified with Composite of Nano-SiO<sub>2</sub> and Styrene Butadiene Styrene Polymer. *Pet. Sci. Technol.* 2016; 34(5): 415–421.
- [16] Rezaei S, Khordehbinan M, Fakhrefatemi S-M-R, Ghanbari S, Ghanbari M. The Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> and the Styrene Butadiene Styrene Polymer on the High-Temperature Performance of Hot Mix Asphalt. *Pet. Sci. Technol.* 2017; 35(6): 553–560.
- [17] Akpolat M, Kök BV, Aydoğmuş E. Research on the Rheological Properties of Asphalt Binder Modified by Fume Silica and Crumb Rubber Compound. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2022.
- [18] Sukhija M, Saboo N, Yadav AK, Rath C. Laboratory Study on the Suitability of Nano-Silica as a Modifier for Asphalt Binders. *Constr. Build. Mater.* 2021; 302(April): 124406.
- [19] Motamedi M, Shafabakhsh G, Azadi M. Evaluating Fatigue-Damage of Asphalt Binder and Mastic Modified with Nano-Silica and Synthesized Polyurethane Using VECD Method. *J. Mater. Civ. Eng.* 2020; 32(8).

- [20] Bhat FS, Mir MS. Rheological Investigation of Asphalt Binder Modified with Nanosilica. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2021; 14(3): 276–287.
- [21] Leiva-Villacorta F, Vargas-Nordbeck A. Optimum Content of Nano-Silica to Ensure Proper Performance of an Asphalt Binder. *Road Mater. Pavement Des.* 2019; 20(2): 414–425.
- [22] Arshad AK, Samsudin MS, Masri KA, Karim MR, Abdul Halim AG. Multiple Stress Creep and Recovery of Nanosilica Modified Asphalt Binder. *MATEC Web Conf.* 2017; 103: 09005.
- [23] Ghanoun SA, Tanzadeh J. Laboratory Evaluation of Nano-Silica Modification on Rutting Resistance of Asphalt Binder. *Constr. Build. Mater.* 2019; 223: 1074–1082.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials.* USA: 2007.
- [25] American Association of State and Highway Transportation Officials. “AASHTO T53-09 Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).” 2004.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *AASHTO T316-Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer This Document Is Only for Acquaintance This Document Is Only for Acquaintance.* USA: 2019.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *AASHTO T350-Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer(DSR), vol. i.* USA: 2012.
- [28] AASHTO. *AASHTO M332-Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.* USA: 2015.
- [29] Wasage TLJ, Stastna J, Zanzotto L. Rheological Analysis of Multi-Stress Creep Recovery (MSCR) Test. *Int. J. Pavement Eng.* 2011; 12(6): 561–568.
- [30] Behnood A, Shah A, McDaniel RS, Beeson M, Olek J. High-Temperature Properties of Asphalt Binders: Comparison of Multiple Stress Creep Recovery and Performance Grading Systems. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2016; 2574(1): 131–143.
- [31] McLEOD NW. Relationship of Paving Asphalt Temperature Susceptibility as Measured By PVN to Paving Asphalt Specifications, Asphalt Paving Mixture Design and Asphalt Pavement Performance NORMAN W. McLEOD1. *Asph. Paving Technol.* 1989; 58(Group C): 410.
- [32] Morrison GR, Lee JK, Hesp SAM. Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification. *J. Appl. Polym. Sci.* 1994; 54(2): 231–240.
- [33] Rajib B. Mallick TE-K, editor. *Pavement Engineering: Principles and Practice.* CRC Press 2017.