



## NİKEL OKSİT KATKI MADDESİNİN ASFALT BAĞLAYICININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNE VE KARIŞIMIN STABİLİTESİNE ETKİLERİ

Mustafa ÇALIŞICI\*

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
İskenderun, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>NMAB, NiO, Asfalt Bağlayıcının Fiziksel Özellikleri, Marshall Stabilitesi.</i>	Bu çalışmada etkin maddesi Nikel Oksit (NiO) olan metalik özellikli yeni bir katkı maddesi ile asfalt bağlayıcı çeşitli oranlarda modifiye edilerek Nikel Modifiye Asfalt Bağlayıcı (NMAB) elde edilmiştir. Elde edilen NMAB üzerinde yapılan fiziksel ve performans deneyleri sonucunda asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinde soğuk iklimlerde kullanımı daha uygun sayılabilecek değişiklikler olduğu görülmüştür. Katkı maddesinin asfalt bağlayıcının penetrasyon değerini ve duktilitesini artırdığı, viskozite ve yumuşama noktasını düşürdüğü tespit edilmiştir. Yapılan Marshall stabilite ve akma testlerinde, modifikasyonun stabilite değerini %4.21, akma değerini ise %5 artırdığı belirlenmiştir.

## EFFECTS OF NICKEL OXIDE ADDITIVE ON PHYSICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDER AND STABILITY OF ASPHALT MIXTURE

Keywords	Abstract
<i>NMAB NiO, Physical Properties Of Asphalt Binder, Marshall Stability.</i>	In this study, nickel modified asphalt binder (NMAB) was obtained by modifying the asphalt binder at various rates with a new additive that has metallic properties, the active ingredient of which is nickel oxide. As a result of the physical and performance experiments performed on the NMAB, it was observed that there were changes in the physical properties of asphalt that could be considered more suitable for use in cold climates. It has been determined that the penetration and ductility of the asphalt binder were increased whereas the viscosity and softening point decreased by the addition of the additive. In the Marshall stability test, it was calculated that the stability value increased by 4.21% and Marshall flow value was found to have increased by 5%.

### Alıntı / Cite

Çalışıcı, M., (2021). Nikel Oksit Katkı Maddesinin Asfalt Bağlayıcının Fiziksel Özelliklerine Ve Karışımın Stabilitesine Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(3), 894-899.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Çalışıcı, 0000-0003-1408-1123

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	03.04.2021
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	14.05.2021
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	22.06.2021
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	21.09.2021

### 1. Giriş (Introduction)

Nüfus artışına paralel olarak artan yük ve yolcu taşımacılığı gereksinimleri, ağır vasıtaların yollarda artan oranları ve teknolojik gelişmeler ile yük taşıyabilme kabiliyetlerinin artmış olması, daha dayanıklı yollara ihtiyacı doğurmaktadır. Yolların dayanımı ise bağlayıcı madde ile doğrudan alakalıdır. Ülkemizde beton yol kullanımının olmadığı ya da çok sınırlı düzeyde olduğu dikkate alınır, asfalt bağlayıcı malzeme oldukça önem kazanmaktadır. Günümüzde katkısız asfalt bağlayıcılar artık yollarda neredeyse kullanılamamaktadır. Asfalt bağlayıcıların ise soğuk ve sıcak iklimlerde mevcut ihtiyaçları karşılayabilecek özelliklere sahip olmaları istenmektedir. Bu nedenle, uzun yıllardır araştırmacılar asfalt bağlayıcıları modifiye etme ve çeşitli özelliklerini geliştirme üzerine çalışmalara yoğunlaşmaktadır. Yollarda bağlayıcı olarak kullanılan asfaltlar organik maddeler olduklarından elde edildikleri petrole ve daha sonra maruz kaldıkları üretim süreçlerine bağlı olarak farklı özellikler göstermekte (Paliukaitė vd.

\* İlgili yazar / Corresponding author: mustafa.calisici@iste.edu.tr, +90-326-613-5600

2014), katkı olarak kullanılan maddeler ise genel olarak asfalt bağlayıcılar üzerindeki fiziksel ve reolojik etkiler ile karakterize edilmektedir (Holý ve Remišová 2019). Asfalt bağlayıcının reolojik değerlendirme kriterlerinden birisi akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanan viskozite değeridir. Bu bağlamda katkı maddelerini viskoziteyi düşüren ve arttıran olarak ikiye ayırmak mümkün olabilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan veya bilinen katkı maddeleri polimer kökenli maddelerdir. Bu tür katkıların en bilineni SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) maddesidir (Yıldırım 2007). SBS katkısı asfalt bağlayıcıların viskozite değerini artırmakta düşük sıcaklıkta düktilite ve yüksek sıcaklıkta ısıya duyarlılık gibi özelliklerini iyileştirmektedir (Zhuang vd. 2017, Teltayev vd. 2019).

Bu çalışmada ağırlıkça çeşitli oranlarda NiO katkı maddesi asfalt bağlayıcıya karıştırılarak bağlayıcı modifiye edilmiş ve %1 - %2 - %3 katkılı NMAB elde edilmiştir. Katkı maddesinin asfalt bağlayıcıya olan etkilerinin anlaşılabilmesi için modifiye asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri geleneksel deneylerle incelenmiş, katkının stabilite üzerine etkileri ise Marshall stabilite ve akma testi ile değerlendirilmiştir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde asfalt bağlayıcıyı modifiye etme ile ilgili oldukça yoğun çalışmalar bulunmaktadır. Modifiye edilerek bazı özellikleri iyileştirilen bağlayıcılar sayesinde daha uzun ömürlü, dayanımı daha yüksek karayolları imalatı mümkün olduğundan konunun cazibesini kaybetmeyeceği düşünülebilir. Yapılan çalışmaların bazılarında atık maddelerin yol malzemesi olarak değerlendirilmesi incelenirken, bazen de etkin olacağı düşünülen yeni maddeler ile yolların dayanımının artırılması araştırılmaktadır. Örneğin yapılan bir çalışmada asfalt bağlayıcı içerisine çeşitli oranlarda endüstriyel çelik çürufu atığı eklenerek bağlayıcının fiziksel özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu atık maddenin eklendiği oranlarda bağlayıcının penetrasyonunu, yumuşama noktasını ve düktilitesini artırdığını tespit edilmiştir (Lakshmi Shruthi, Kalpana, ve Vijayan 2020). Bir çalışmada, asfalt bağlayıcıya ilave edilen Stiren - Butadien - Stiren polimer modifiye katkısı (SBS), atık lastik kauçuğu (GTR), ve polifosforik asit (PPA) gibi maddelerin asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen modifiye numunelere superpave testleri uygulanmış ve tüm katkıların asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerine faydalı olduğu tespit edilmiştir. BBR test sonuçlarına göre ise polimer katkıların bağlayıcının rijitliğini arttırdığı, bunun ise deformasyonlara karşı etkili olacağı belirtilmiştir (Behnood ve Olek 2017). Başka bir çalışmada ise grafen'in asfalt bağlayıcının reolojik ve termal özelliklerine etkisini araştırmak için, bağlayıcı çeşitli oranlarda modifiye edilmiş, bunun için ise iki farklı viskozite dereceli bitümlü bağlayıcı (VG30 ve VG40) kullanılmıştır. Yapılan reolojik testler sonucunda katkı maddesinin %1 ve %1.5 oranlarında bulunduğu karışımlar için yüksek sıcaklıklarda asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerinin geliştiği, bunun da tekerlek izi direncini artırdığı belirtilmiştir (Ahmad Nazki, Chopra, ve Chandrappa 2020). Nano ferrik oksit ( $Fe_2O_3$ ) maddesinin asfalt bağlayıcının reolojik ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise  $Fe_2O_3$  nano partiküllerinin bağlayıcının reolojik özelliklerini geliştirdiği, %1 oranında katkı kullanımının sıcak asfalt karışımlar için teker izi dayanımını artırdığı, bu katkı maddesinin genel olarak bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği ve karışımın nem hasarına karşı ise daha dirençli hale geldiğini tespit edilmiştir (Karahancer vd. 2020). Yine bir çalışmada sasobit ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı, sıyrma önleyici madde, Kırıntı Kauçuğu (CR), Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ve Polifosforik Asit (PPA) FT - maddeleri ile bu katkıların sasobit ile uyumluluğunu değerlendirmek için tekrar modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş bağlayıcıların morfolojik, reolojik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, sıyrma önleyici maddenin bitümlü bağlayıcının viskozitesini düşürdüğünü ve sıcak asfalt karışımların karıştırma/sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmesine rağmen, düşük sıcaklıklarda sasobit modifiye bitümlü bağlayıcının sertliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bunların arasında, sasobit ve parça kauçuk kombinasyonu, özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir (Fazaeli vd. 2016). Ukrayna'da yapılan bir çalışmada ise coumarone-indene reçinesi (CIR) kullanılarak asfalt bağlayıcı çeşitli oranlarda modifiye edilmiştir. Bu katkı ile bağlayıcının adezyon özelliğinin arttığı, ancak katkı maddesinin bağlayıcının yumuşama noktasını da arttırdığı, yani bağlayıcıyı rijitleştirdiği tespit edilmiştir. Bu durumu dengelemek için ise reçinenin yine Ukrayna'da üretilen bir tür katran ile birlikte kullanılabileceği tavsiye edilmiştir (Pyshyev vd. 2017). Araştırmacıların büyük kısmı halihazırda en çok katkı maddesi olarak kullanılan SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) üzerine yoğunlaşmışlardır (De Sá Araujo vd. 2013; Tayfur, Ozen, ve Aksoy 2007; Wang vd. 2016; Günay ve Ahmedzade 2020; tur Rasool vd. 2017; Ouyang vd. 2006; Larsen vd. 2009). Polimer SBS katkısının genel olarak asfalt bağlayıcının penetrasyon derecesini düşürdüğü, yumuşama noktasını arttırdığı, Marshall stabilitesini arttırdığı gibi sonuçlara ulaşılmıştır. SBS katkısı özellikle teker izi, oluşabilecek çatlak ve deformasyonlara kaplamanın dayanımını arttırmak için önerilmektedir (Zhang ve Hu 2013).

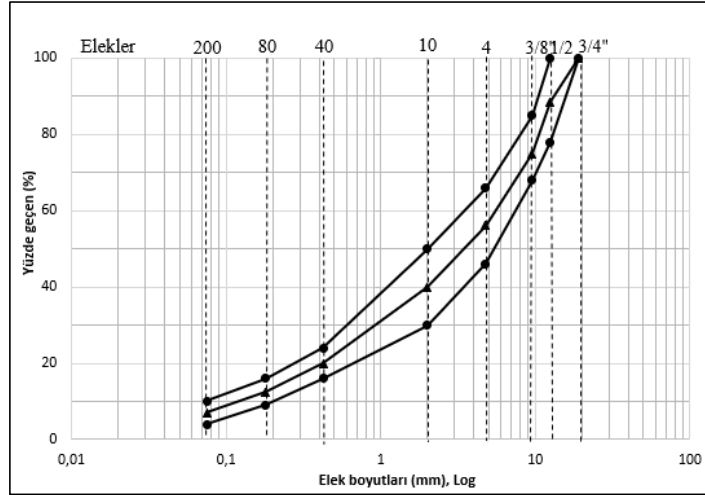
## 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak 50/70 penetrasyon dereceli asfalt çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

**Tablo 1.** 50/70 penetrasyon katkısız asfalt bağlayıcının özellikleri (Properties of 50/70 penetration original asphalt binder)

Özellik	Değer	Standart
Özgül ağırlık, 25 °C (gr/cm <sup>3</sup> )	1.03	ASTM D-70
Penetrasyon, 25 °C (0.1 mm, 5 sn.)	62.70	ASTM D-5
Viskozite, 130 °C, (Pa.s)	0.310	ASTM D-4402
Yumuşama noktası, (°C)	50.8	ASTM D-36

Marshall stabilite ve akma testinde agrega olarak bazalt malzeme kullanılmıştır. Kullanılan agrega gradasyonu ise Şekil 1’de gösterildiği gibidir.

**Şekil 1.** Marshall testi agrega gradasyon eğrisi ve limitleri (Marshall test aggregate gradation limits)

Karışımında etkin katkı maddesi olarak kullanılan Nikel Oksit (NiO) (Merck) %99.8 saflıkta olup, partikül boyutu 50 nm altında ve yoğunluğu 25°C de 6.67 g/ml’dir. Nikel oksit, iyi bir yarı iletken özelliğe sahip metal oksit bazlı bir materyaldir. Yük transferi ve yük taşıma bazlı süreçler gerektiren uygulamalarda yüksek performans gösterir. Nikel oksit, Pil, elektrokromik kaplamalar, porselen ve seramik sektörü de dahil bir çok alanda kullanılmaktadır.

Çalışmada modifiyer olarak kullanılan NiO katkı maddesi, laboratuvarında yağlı ortamda reçine ile NiO maddesinin reaksiyona sokulmasıyla elde edilmiş, reaksiyonda katalizör olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır.

Katkı maddesinin asfalt bağlayıcı ile karışımı için bağlayıcı 120 °C ye kadar ısıtılmış daha sonra ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında asfalt bağlayıcıya 120°C sıcaklıktaki yağ banyosu ortamında ilave edilmiştir. Karıştırma 15 dk. boyunca 1300 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilerek modifiye asfalt bağlayıcılar elde edilmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcılar bir gün dinlendirilerek deneylere tabi tutulmuştur.

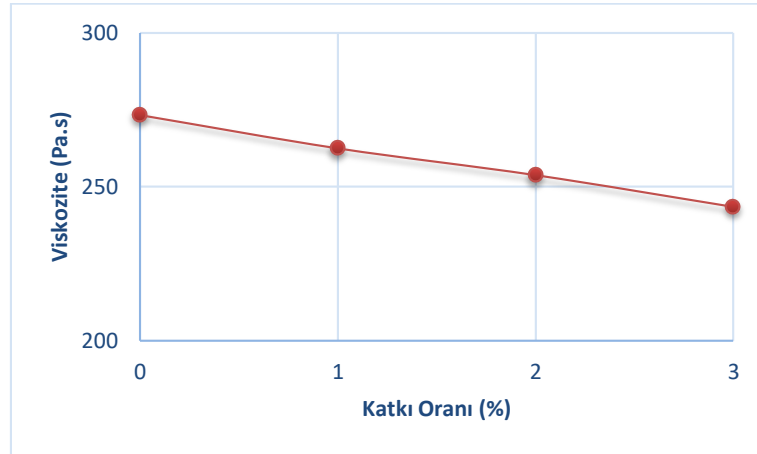
Elde edilen modifiye asfalt bağlayıcılara penetrasyon (ASTM D5), yumuşama noktası (ASTM D36), düktilite (15 °C ve 25°C) (ASTM D113), kütle kaybı (ASTM D6) ve dönel viskozite (ASTM D4402) deneyleri yapılmıştır. Nikel oksit temelli katkının karışım stabilitesine etkisinin anlaşılması için; Marshall stabilite testi (ASTM D6926) ilk olarak katkısız asfalt bağlayıcı ile karışım hazırlanarak gerçekleştirilmiş ve optimum bağlayıcı oranı elde edilmiştir. Daha sonra %2 NMAB ile aynı oranda Marshall briketleri hazırlanmıştır. Bir gün bekletilen briketlerin kırılmasıyla modifiye asfalt karışımının stabilite özellikleri tespit edilmiştir.

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Katkısız asfalt bağlayıcı ve modifiye asfalt bağlayıcılar için yapılan fiziksel deney sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde, nikel oksit temelli metalik katkı maddesinin ilave edildiği orana göre bağlayıcının penetrasyon değerini artırmakta, yumuşama noktasını ise düşürmekte olduğu görülmektedir. Kütle kaybı açısından bakıldığında katkı maddesi ilavesi oranı arttıkça kütle kayıplarında artış olduğu görülse de katkının %3 oranında bile kütle kaybı değeri KGM şartname limiti olan %1’in altında kaldığı anlaşılmaktadır (KGM 2013). Nikel oksit temelli metalik katkının asfalt bağlayıcının viskozitesi üzerine etkisi Şekil 2’de görülmektedir.

**Tablo 2.** Katkısız ve modifiye asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri (Physical properties of original and modified asphalt binder)

Bağlayıcı Madde	Penetrasyon (25 °C, 0,1 mm)	Yumuşama noktası (°C)	Düktilite (25 °C, cm)	Düktilite (15 °C, cm)	Kütle Kaybı (%)
Katkısız Asfalt	62.7	50.8	>100	77.6	0.25
%1 NMAB	66.8	48.7	>100	92.4	0.16
%2 NMAB	69.5	47.4	>100	>100	0.40
%3 NMAB	71.6	46.5	>100	>100	0.81

**Şekil 2.** Katkı oranı- viskozite ilişkisi (Variation of viscosity with the additive ratio)

Katkı maddesi oranının artması ile asfalt bağlayıcının viskozitesini düşürdüğü Şekil 2'den görülmektedir. Bazı metal oksitlerin daha önce de asfalt bağlayıcının viskozitesini düşürdüğü rapor edilmiştir (Liu vd. 2020; Calisici 2009). Asfalt bağlayıcıların ısıya duyarlılığı ile ilgili bir parametre de penetrasyon indeksidir (PI) (Kuloğlu, Yılmaz, ve Kök 2008). Tablo 3'de NMAB ve katkısız asfalt bağlayıcılara ait PI değerleri görülmektedir. Katkısız ve modifiye asfalt bağlayıcıların PI değerleri Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(\text{pen}) - 20YN}{50 \log(\text{pen}) - YN - 120} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de (pen), asfalt bağlayıcının 25°C deki penetrasyon değerini, YN ise yumuşama noktasını ifade etmektedir.

PI değerinin azalması ısıya duyarlılığın artışı olarak yorumlansa da, bu değer -2'nin altında olmaması ısıya duyarlılığın aşırı olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır (Geçkil ve Seloğlu 2019). Tablo 3 incelendiğinde katkı oranının artmasıyla asfalt bağlayıcıların PI değerinin düşmesi, modifiye bağlayıcıların ısıya duyarlılığında artış olarak görünse de, tüm oranların kabul edilebilir sınır içinde kaldığı görülmektedir.

**Tablo 3.** Bağlayıcı türü - Penetrasyon indeksi (PI) (Binder type - Penetration index (PI))

Bağlayıcı türü	PI
Katkısız Asfalt	-0,46167
%1 NMAB	-0,84703
%2 NMAB	-1,10235
%3 NMAB	-1,28187

Tablo 2'den düktilite ve kütle kaybı değerleri birlikte dikkate alınarak, 15°C deki düktilitenin 100 cm'yi geçtiği ilk oran olan %2, ayrıca bu oranda kütle kaybının çok yüksek olmadığı da düşünülerek optimum katkı oranı olarak seçilmiştir. Daha sonra bu orandaki katkılı modifiye asfalt bağlayıcılar Marshall stabilite ve akma testine tabi tutulmuştur.

Marshall testi için öncelikle katkısız asfalt bağlayıcı ile karışım yapılmış, %4 ile %6 arası her %0.5 oranı için 3'er numune hazırlanmıştır. Karıştırılan numuneler her iki tarafına 75'er darbe vurularak sıkıştırılmış, bir gün bekletildikten sonra kırılarak stabilite değerleri ölçülmüş ve optimum bağlayıcı oranı hesaplanmıştır. Marshall testi sonucunda katkısız asfalt bağlayıcı ile hazırlanan numunelerin optimum bağlayıcı oranı %4.7 olarak elde edilmiştir. Daha sonra aynı bağlayıcı oranı, %2 NMAB için de hazırlanarak modifiye bağlayıcının stabilite ve akma değerine ulaşılmıştır. Marshall testi sonuçları Tablo 4'de sunulmuştur.

**Tablo 4.** Marshall Stabilite testi sonuçları (Marshall Stability test results)

Bağlayıcı	Marshall Stabilite (Kg)	Akma (mm)
Katkısız Asfalt	773,6	4.0
%2 NMAB	806,2	4.2

Stabilite değeri, trafik yükünün etkisiyle oluşacak deformasyonlara karşı kaplamanın gösterdiği direnci ifade etmektedir. Stabilite değerinin yükselmesi kalıcı deformasyona karşı direnç yeteneğinin artmasıdır. Tablo 4 incelendiğinde optimum bağlayıcı oranında yapılan Marshall testi sonucunda %2 NMAB ile yapılan karışımın stabilite değerinde %4.21 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Karayolları teknik şartnamesinde Binder tabakası için en az 750 kg stabilite gerekmektedir (KGM 2013). Akma değeri stabilite testinde numunenin kırılma anına kadar yaptığı deformasyondur. Tablo 4 'de katkı maddesinin sıcak asfalt karışım numunesinin akma değeri 0.2 mm artırmış olduğu görülmektedir.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Nikel Oksit katkı maddesi ile çeşitli oranlarda modifiye edilen asfalt bağlayıcının (NMAB) fiziksel ve performans özellikleri değerlendirilmiştir.

Nikel oksit katkı asfalt bağlayıcıya katıldığı oranda bağlayıcının viskozitesini ve yumuşama noktasını düşürmektedir. Viskozite değerinin düşmesi sıcak asfalt karışımın işlenebilirliğinin artması anlamına gelmektedir.

Bağlayıcının daha düşük viskozite değerine sahip olması ve düktilitesinin artması teker izi deformasyonuna, yorulma çatlağına ve soyulmaya karşı daha dirençli bir karışım olabileceğinin göstergesidir (Caputo vd. 2020).

Tablo 2, Tablo 3 ve Şekil 2 birlikte değerlendirildiğinde bir metal oksit olan NiO katkısının asfalt bağlayıcının viskozitesini düşürmesi, düktilitesini artırması ve PI değerinin eksi değerlerde hesaplanması sonucunda, modifiye edilmiş bağlayıcının iklimsel olarak daha serin olan bölgelerde kullanımının uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Viskozite ve yumuşama noktasındaki düşüş, sıcak asfalt karışımın imalatı esnasında düşük sıkıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyması veya daha az enerji tüketimi anlamına gelmektedir (Yang ve Tighe 2013).

Halihazırda en çok kullanılan polimer katkı maddelerinin yüksek karıştırma ısıları ve yüksek karışım süreleri dikkate alındığında (Robert, Self, ve John 2015; Babalghaith vd. 2019), NiO katkı maddesinin, kısa karıştırma süresine ve nispeten düşük karışım ısısına ihtiyaç duyması da bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Katkı oranı arttıkça kütle kaybı değeri artmakta, PI indeksi ise azaltılmaktadır. Ancak şartname limitleri ve kabul edilebilir seviyeler dikkate alındığında çalışmadaki tüm katkı oranları kullanım şartlarını sağlamaktadır.

%2 NMAB ile yapılan sıcak asfalt karışımın Marshall stabilite değeri katkısız bağlayıcı ile elde edilen değere göre %4.21 artmıştır. Akma değerinde ise 0,2mm'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Her ne kadar fiziksel özellikler bazı somut bilgiler sağlasa da modifiye bağlayıcıların superpave sisteminde reolojik testlere de tabi tutularak farklı sıcaklıklardaki davranışının belirlenmesi önerilmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

## Kaynaklar (References)

Ahmad Nazki, M., Chopra, T., and Chandrappa, A.K. 2020. Rheological properties and thermal conductivity of bitumen binders

- modified with graphene. *Construction and Building Materials*, 238: 117693. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117693.
- Babalgahith, A.M., Koting, S., Ramli Sulong, N.H., and Karim, M.R. 2019. Optimization of mixing time for polymer modified asphalt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512(1). doi:10.1088/1757-899X/512/1/012030.
- Behnood, A., and Olek, J. 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 151: 464–478. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115.
- Calisici, M. 2009. Bitümün Sentetik Metal ve Polimer Katkı Maddeleriyle Yaşlanma Direncinin Arttırılması”, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Caputo, P., Porto, M., Angelico, R., Loise, V., Calandra, P., and Oliviero Rossi, C. 2020. Bitumen and asphalt concrete modified by nanometer-sized particles: Basic concepts, the state of the art and future perspectives of the nanoscale approach. *Advances in Colloid and Interface Science*, 285: 102283. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.cis.2020.102283.
- Fazaeli, H., Amini, A.A., Nejad, F.M., and Behbahani, H. 2016. Rheological properties of bitumen modified with a combination of FT paraffin wax (sasobit®) and other additives. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(2): 135–145. doi:10.3846/13923730.2014.897977.
- Geçkil, T., and Seloğlu, M. 2019. Reaktif Terpolimerin Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Duyarlılığına Etkisi, The Effect of Reactive Terpolymer on The Stiffness and Temperature Susceptibility of Bitumen. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 31(1): 203–213.
- Günay, T., and Ahmedzade, P. 2020. Physical and rheological properties of nano-TiO<sub>2</sub> and nanocomposite modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 243. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118208.
- Holý, M., and Remišová, E. 2019. Characterization of Bitumen Binders on the Basis of Their Thermo-Viscous Properties. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(1): 25–31. doi:10.2478/sjce-2019-0004.
- Karahancer, S., Enieb, M., Saltan, M., Terzi, S., Eriskin, E., Cengizhan, A., and Akbas, M.Y. 2020. Evaluating mechanical properties of bitumen and hot mix asphalt modified with nano ferric oxide. *Construction and Building Materials*, 234: 117381. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117381.
- KGM. 2013. Karayolu teknik şartnamesi 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M., and Kök, B.V. 2008. Farklı penetrasyon derecelerine sahip asfalt çimentolarının kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve işlenebilirliklerinin incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1): 81–91.
- Lakshmi Shruthi, V., Kalpana, M., and Vijayan, D.S. 2020. An experimental study on mechanical properties of bitumen added with industrial waste steel slag. *Materials Today: Proceedings*, 33: 48–51. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.032.
- Larsen, D.O., Alessandrini, J.L., Bosch, A., and Cortizo, M.S. 2009. Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing. *Construction and Building Materials*, 23(8): 2769–2774. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.03.008.
- Liu, Y., Qiu, Z., Zhao, C., Nie, Z., Zhong, H., Zhao, X., Liu, S., and Xing, X. 2020. Characterization of bitumen and a novel multiple synergistic method for reducing bitumen viscosity with nanoparticles and surfactants. *RSC Advances*, 10(18): 10471–10481. Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/d0ra00335b.
- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., and Zhang, Y. 2006. Improving the aging resistance of styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer modified asphalt by addition of antioxidants. *Polymer Degradation and Stability*, 91(4): 795–804. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2005.06.009.
- Paliukaitė, M., Vaitkus, A., and Zofka, A. 2014. Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. 9th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2014, (May 2016). doi:10.3846/enviro.2014.162.
- Pyshyev, S., Gunka, V., Grytsenko, Y., Shved, M., and Kochubei, V. 2017. Oil and gas processing products to obtain polymers modified bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(4): 289–296. Chinese Society of Pavement Engineering. doi:10.1016/j.ijprt.2017.05.001.
- Robert, N.H., Self, A., and John, R. 2015. The Shell bitumen handbook. *In Shell bitumen*.
- De Sá Araujo, M.D.F.A., Lins, V.D.F.C., Pasa, V.M.D., and Leite, L.F.M. 2013. Weathering aging of modified asphalt binders. *Fuel Processing Technology*, 115: 19–25. doi:10.1016/j.fuproc.2013.03.029.
- Tayfur, S., Ozen, H., and Aksoy, A. 2007. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2): 328–337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014.
- Teltayev, B.B., Rossi, C.O., Izmailova, G.G., Amirbayev, E.D., and Elshibayev, A.O. 2019. Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 11. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00238.
- tur Rasool, R., Wang, S., Zhang, Y., Li, Y., and Zhang, G. 2017. Improving the aging resistance of SBS modified asphalt with the addition of highly reclaimed rubber. *Construction and Building Materials*, 145: 126–134. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.242.
- Wang, Q., Li, S., Wu, X., Wang, S., and Ouyang, C. 2016. Weather aging resistance of different rubber modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 106: 443–448. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.138.
- Yang, J., and Tighe, S. 2013. A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(Cictp): 1269–1276. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.sbspro.2013.08.144.
- Yildirim, Y. 2007. Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1): 66–72. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007.
- Zhang, F., and Hu, C. 2013. The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur. *Construction and Building Materials*, 43: 461–468. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.001.
- Zhuang, C., Li, N., Zhao, W., and Cai, C. 2017. Effects of SBS Content on the Performance of Modified Asphalt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 216(1). doi:10.1088/1757-899X/216/1/012028.