



Investigation of the effects of molasses-based fly ash compound on bitumen and bituminous mixture properties by laboratory tests

Deniz Arslan^{1*}, Metin Gürü², M. Kürşat Çubuk³, Şeyma Öztürk⁴

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, 42250, Selçuklu, Konya, Türkiye

²Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

³Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

⁴Department of Civil Engineering, Technology Faculty, Gazi University, 06500, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Molasses based fly ash compound (MEUKB) modified bitumen
- MEUKB effects on bitumen rheology
- MEUKB effects on bituminous mixtures properties

Keywords:

- Bitumen
- Molasses
- Fly ash
- Modified bitumen
- Dynamic shear rheometer

Article Info:

Research Article

Received: 01.06.2022

Accepted: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1124843

Correspondence:

Author: Deniz Arslan

e-mail: darslan@ktun.edu.tr

phone: +90 332 2051783

Graphical/Tabular Abstract

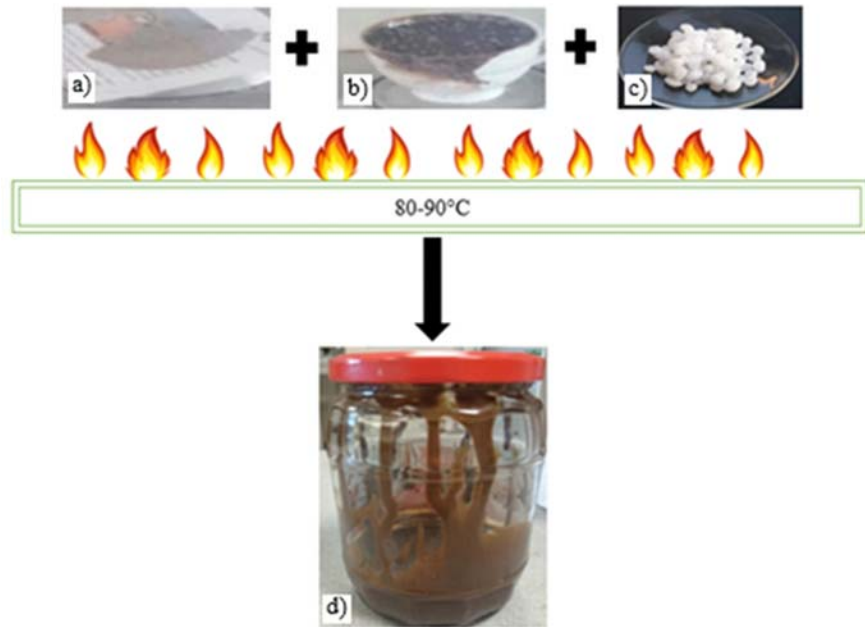


Figure A. Mechanism of additive synthesizing

Purpose:

The purpose of the study was to evaluate the effects of molasses based fly ash compound (MEUKB), which was derived chemically as seen in Figure A, on the engineering properties of bitumen and bituminous mixtures

Theory and Methods:

Rotational viscosity and dynamic shear rheometer tests were used in rheological definition of the modified bitumens. Assessment of MEUKB on bituminous mixture properties were performed through Marshall and Nicholson stripping tests.

Results:

Viscosity and complex shear modulus were found to be increased by MEUKB doping. Marshall stability and stripping resistance of the bituminous mixtures were increased 10.6 % and 85-90 %, respectively.

Conclusion:

Roadway pavements manufactured with 3% MEUKB modified bitumen will show greater resistance to deformation type distresses, especially rutting, and stripping problems which may occur more often in regions with heavy rainfall.



Melas esaslı uçucu kül bileşiğinin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkilerinin laboratuvar testleri ile incelenmesi

Deniz Arslan^{1*}, Metin Gürü², M. Kürşat Çubuk³, Şeyma Öztürk⁴

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu, Konya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

⁴Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Melas esaslı uçucu kül bileşiği (MEUKB) modifiyeli bitüm
- MEUKB'nin bitümün reolojisi üzerindeki etkileri
- MEUKB'nin bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.06.2022

Kabul: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1124843

Anahtar Kelimeler:

Bitüm,
melas,
uçucu kül,
modifiye bitüm,
dinamik kayma reometresi

ÖZ

Bu çalışmada şeker pancarı melası ve uçucu kül kullanılarak laboratuvar ortamında Melas Esaslı Uçucu Kül Bileşiği (MEUKB) olarak isimlendirdiğimiz yeni bir katkı maddesi sentezlenmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm, ağırlıkça %2, %3, %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında MEUKB ile modifiye edilmiştir. MEUKB modifikasyonunun bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere rotasyonel viskozite (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), Marshall tasarımları ve Nicholson soyulma testleri uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre MEUKB ile bitümün akma ve deformasyon direncinin iyileştiği tespit edilmiştir. Bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncinde %41,7'ye kadar artış hesaplanmıştır. Bitümün %3 oranında MEUKB ile modifikasyonu sonucunda bitümlü karışımların stabilitesinde %10,6'ya varan artışlar meydana gelmiştir. Bununla birlikte, agrega-bitüm karışımlarının soyulma direnci %85-90 seviyesine kadar yükselmiştir.

Investigation of the effects of molasses-based fly ash compound on bitumen and bituminous mixture properties by laboratory tests

H I G H L I G H T S

- Molasses based fly ash compound (MEUKB) modified bitumen
- MEUKB effects on bitumen rheology
- MEUKB effects on bituminous mixtures properties

Article Info

Research Article

Received: 01.06.2022

Accepted: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1124843

Keywords:

Bitumen,
Molasses,
fly ash,
modified bitumen,
dynamic shear rheometer

ABSTRACT

In this study; a new additive material, which we called Molasses Based Fly Ash Compound (MEUKB), was synthesized in laboratory using sugar beet molasses and fly ash. 50/70 penetration bitumen was modified with MEUKB at 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7% and 8% by weight. Rotational viscosity (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Marshall designs and Nicholson stripping tests were applied in order to evaluate the effects of MEUKB on bitumen and bituminous mixture properties. According to the test results, the yield and deformation resistance of the bitumen were determined to be improved by MEUKB. An increase up to 41.7% in rutting resistance of the bitumen was calculated. As a result of the modification of bitumen with 3% MEUKB, the stability of the bituminous mixtures was enhanced up to 10.6%. Moreover, stripping resistance of the aggregate-bitumen mixtures was raised to a level of 85-90%.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *darslan@ktun.edu.tr, mguru@gazi.edu.tr, ckursat@gazi.edu.tr, seyma.ozturk1@gazi.edu.tr / Tel: +90 532 167 0844

1. Giriş (Introduction)

Esnek üstyapıların kaplama tabakaları olan aşınma, binder ve bitümlü temel; agrega-bitüm karışımlarının uygun sıcaklıkta serilip sıkıştırılmasıyla inşa edilir. Karışımın büyük kısmını agrega oluştursa da bağlayıcı olarak kullanılan bitümün sahip olduğu nitelikler kaplamanın yapısal özelliklerini etkiler. Esnek üstyapılarda trafik, çevre ve iklimsel etkiler sebebiyle tekerlek izi oluşumu, çatlama, soyulmalar gibi bozulmalar meydana gelir. Karışımında kullanılan bitümün üstün nitelikte olması üstyapının bozulmalara karşı daha dirençli olması bakımından arzu edilir. Bu suretle; rafineride ham petrolün ayrıştırılmasıyla elde edilen bitümün, sonrasında çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek modifiye edilmesi ve özelliklerinin iyileştirilmesi bu alandaki araştırmacıların hedefleri arasındadır. Literatürde bu hedef doğrultusunda göze çarpan ilk katkı maddesi Stiren-Bütadien-Stiren (SBS)'dir. Bitümün SBS ile modifiyesi sonucu tekerlek izi oluşumuna karşı direnci [1, 2], sıcaklığa olan hassasiyeti [3], agrega-bitüm karışımlarının Marshall özellikleri iyileşmiştir [4, 5]. SBS gibi polimer grubu katkı maddesi olan Etilen-Vinil-Asetat (EVA), Polietilen Tereftalat, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) modifikasyonlarıyla bitümlü karışımların Marshall Stabilite değerinde artışlar sağlanmıştır [1, 6, 7]. Bunlardan başka; kauçuk [8], yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) [9], kil [10, 11] gibi katkı maddeleri üzerine yoğunlaşan çalışmalarda bitümün ve/veya bitümlü karışımların özelliklerinde gelişmeler elde edilmiştir. Son yıllarda melas ile modifiye edilen bitümlerle ilgili araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Şeker üretiminde atık olarak ortaya çıkan melasın şeker kamışı ve şeker pancarı melası gibi farklı türleri bulunmaktadır. Şeker kamışı melasının bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncini artırdığı [12], karışım stabilitesinde değişimler oluşturduğu [13] raporlanmıştır. Bunlarla birlikte; şeker kamışı melasının bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfını yükseltebileceği, ancak fazla oranda kullanılması olumsuz etkileyebileceği görülmüştür [14]. Şeker kamışı melasının yüksek oranda kullanılmasıyla bitümlü karışım stabilitesinde azalma meydana gelmiştir [15]. Şeker pancarı melası, şeker kamışı melasından kompozisyon olarak oldukça farklıdır. Düşük oranda (%5'e kadar) şeker pancarı melası ile modifiye edilen bitümlerin viskozitesinde azalma görülürken daha yüksek oranlarda ise viskozite artmıştır. Bununla birlikte, şeker pancarı melası ile modifiye edilen bitümlerin karışım stabilitesi ve soyulma direnci üzerinde pozitif etkisi görülmemiştir. Ancak, şeker pancarı melası ve bor oksit ile hazırlanan katkı maddesiyle hem bitüm viskozitesinde sürekli bir artış hem de bitümlü karışım stabilitesinde ve soyulma direncinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır [16].

Şeker pancarı melası, adersanı çok yüksek olan bir karbonhidrattır. Uçucu kül içerisindeki metal oksitlerin karbonhidratlara bağlanması ile kararlılık artacak, bitümün apolar yapısında polar yüzeyler meydana gelecektir. Şeker pancarı melası ve uçucu kül ile sentezlenecek katkı maddesi, bitümün özelliklerini geliştirerek bitümlü karışım performansını olumlu yönde etkileyecektir. Bu suretle; çalışma kapsamında termik santrallerdeki ve şeker fabrikalarındaki proseslerde atık olarak elde edilen uçucu kül ve şeker pancarı melası kullanılarak Melas Esaslı Uçucu Kül Bileşiği (MEUKB) olarak isimlendirdiğimiz yeni bir katkı maddesi kimyasal olarak sentezlenmiş ve bitüm modifiyeri olarak kullanılmıştır. 50/70 penetrasyonlu katkısız bitüme ağırlıkça %2, %3, %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında MEUKB ilave edilmiştir. MEUKB modifikasyonunun etkisiyle bitüm ve agrega-bitüm karışımlarında

meydana gelen değişimlerin rotasyonel viskozite (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), Marshall tasarımı ve Nicholson soyulma testleri ile incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Malzeme ve Metot (Material and Method)

2.1. Malzeme (Material)

Bitümlü karışımlarda bazalt türü agrega kullanılmıştır. Agrega, Ordu'da bulunan İslamdağ Taş Ocağı'ndan temin edilmiştir. Marshall briketleri Tablo 1'de görülebileceği üzere Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) aşınma tabakası için tanımlanan Tip-1 gradasyonuna ait ortalama değerler kullanılarak imal edilmiştir. Agregaya ait özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Agreganın fiziksel özellikleri. (Physical properties of the aggregate)

	Kaba Agrega	İnce Agrega	Fille r
Hacim Özgül Ağırlık	2,557	2,546	
Zahiri Özgül Ağırlık	2,602	2,590	2,585
Su emme, %	0,85	1,27	
Yassılık İndeksi, %	12,73		
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	14,38		

Agrega-bitüm karışımlarında Karayolları Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. 50/70 penetrasyonlu bitüme ait özellikler. (Properties of 50/70 penetration bitumen)

Özellik	Değer	Standart
Penetrasyon (25°C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	61,8	ASTM D5
Yumuşama noktası, °C	54,6	ASTM D36
Parlama noktası, °C	271	BS EN 22592
Özgül ağırlık, 25°C	1,029	ASTM D70
Viskozite (140°C), Pa.s	0,212	ASTM D4402
Viskozite (130°C), Pa.s	0,336	ASTM D4402

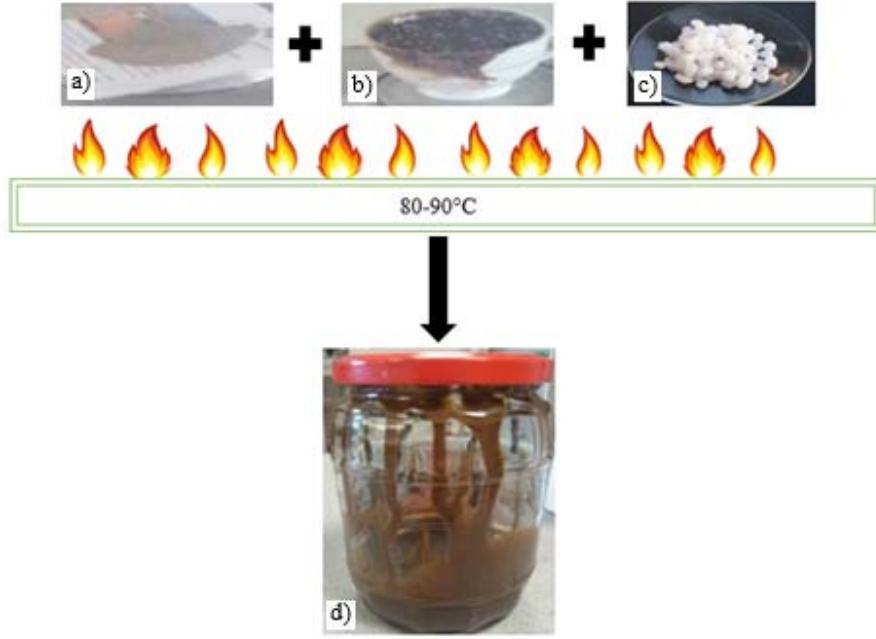
2.2. Katkı Maddesinin Hazırlanması (Preparation of the Additive)

Çalışmada, bitümü modifiye etmek için laboratuvar ortamında tarafımızca şeker pancarı melası, uçucu kül ve kostik kullanılarak sentezlenen yeni bir katkı maddesi kullanılmıştır. Şeker pancarı melası, fabrikada şeker üretiminde işleme tekrar dahil edilemeyen şekerin son şurubudur. Uçucu kül, termik santrallerdeki atık malzemedir ve metal oksitler içerir. Kostik, nem emicidir ve içeriğinde sodyum, hidrojen ve oksijen atomları bulunur. Kullanılan şeker pancarı melası ve kostik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Katkı maddesinin sentezinde mantolu ısıtıcı ile 80-90°C'de ısıtılan şeker pancarı melasına uçucu kül ve kostik kademeli olarak ilave edilmiş ve aynı zamanda manyetik karıştırıcı ile sürekli karıştırma işlemi uygulanmıştır. Şeker pancarı melası-uçucu kül kütle oranı 10:1 olarak ayarlanmış ve bir tablet kostik kullanılmıştır. Elde edilen Şeker Pancarı Melası Esaslı Uçucu Kül Bileşiği (MEUKB) proses özeti ile birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Marshall briketlerinde kullanılan agrega gradasyonu. (Aggregate gradation used in Marshall briquettes)

Elek No.	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
% Geçen	100	94	81	47	30	15	10,5	5,5



Şekil 1. (a) uçucu kül; (b) şeker pancarı melası; (c) kostik; (d) Melas Esaslı Uçucu Kül Bileşiği (MEUKB).
(a) fly ash; (b) sugar beet molasses; (c) caustic; (d) Sugar beet molasses-based fly ash compound)

Tablo 4. Melas ve kostik özellikleri. (Properties of molasses and caustic)

Malzeme	Özellik	Değer
Şeker pancarı melası	Yoğunluk	1 g/cm ³
	Fiziksel durum	Yarı akışkan
	Sakkaroz	48%
	İnvert şeker	1,60%
	İnorganik oksitler	25,30%
	H ₂ O	25,10%
Kostik	Molekül ağırlığı	39,9971 g/mol
	Yoğunluk	2,1 g/cm ³
	Erime noktası	318°C
	Kaynama noktası	1390°C

2.3. Modifiye Bitüm Üretimi (Production of Modified Bitumen)

Katkısız bitüm 120°C'de tamamen eriyene kadar etüvde ısıtılmıştır. Akıcı hale gelen bitüm, etüvde ısıtılmış metal kap içerisine yeterli miktarda koyulmuştur ve hemen ardından önceden 120°C'ye ayarlanmış yağ banyosu içinde MEUKB ilave edilerek 1300 rpm hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile 20 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümün oda sıcaklığına kadar soğumasını takiben metal kabın ağzı kapatılmış ve 24 saat bekletilmiştir. Modifiye bitümler 24 saatlik kür süresi sonrası deneylere tabii tutulmuştur. MEUKB, katkısız bitüme ağırlıkça %2, %3, %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında ilave edilmiştir.

Modifiye bitüm üretimindeki modifikasyon parametrelerinin belirlenmesinde izlenen süreç şöyle özetlenebilir;

120°C ve 20 dakikalık modifikasyon parametreleri belirlenmeden önce farklı sıcaklık ve karıştırma süreleri seçilerek hazırlanan modifiye bitümlere viskozite testleri uygulanmış ve modifikasyon etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hem modifikasyon parametrelerinin düşük tutulacağı hem de viskozitede kabul edilebilir ve etkili değişimlerin oluştuğu karıştırma süresi ve sıcaklığı seçilerek, modifikasyon süreci boyunca bitümün maruz kalacağı yaşlanma etkisi ve oluşacak emisyon ve enerji sarfiyatının en aza indirilmesi

hedeflenmiştir. Farklı modifikasyon denemelerinde karıştırma sıcaklığının ve süresinin artması ile viskozitedeki değişimin arttığı görülmüştür. Ancak bu değişimin azalarak artan nitelikte olduğu da tespit edilmiştir. Karıştırma sıcaklığının 120°C'yi, karıştırma süresinin 20 dakikayı aştığında viskozite artışı giderek yavaşlamıştır. Bu bulgular ve modifikasyon sürecindeki toplam hedefler dikkate alındığında modifikasyon parametrelerinin 120°C ve 20 dakika olması uygun görülmüştür.

2.4. Metot (Method)

Laboratuvar ortamında sentezlenen yeni katkı maddesi olan MEUKB'nin bitüm ve bitüm-agrega karışımları üzerindeki etkisini incelemek üzere rotasyonel viskozite (RV), Dinamik Kayma Reometresi (DSR), Marshall tasarımı ve Nicholson Soyulma testleri uygulanmıştır. RV ve DSR testleri ABD'de geliştirilen performans esaslı bitüm sınıflandırma sisteminde kullanılan testler arasındadır. RV testleri Brookfield DV III Ultra marka reometre ve 29 no.'lu uç (spindle) kullanılarak 90°C-160°C arasında ASTM D4402'ye uygun olarak yapılmıştır. Deney tüpünün içinde ölçüm yapılacak test sıcaklığına getirilen bitüm numunesine daldırılan ucun (29 no.'lu spindle) kendi eksenine etrafında dönüşüne karşı bitümün direnç göstermesi ve gösterdiği direncin ölçümü viskozite değerini vermektedir. Katkısız ve modifiye bitümlere ait viskozite değerleri her bir farklı sıcaklıkta en az üç adet ölçüm yapılarak ortalamaları alınarak elde edilmiştir. DSR testleri 64°C ve 70°C'de 10 rad/sn'lik frekans ile AASHTO T315'e göre yaşlandırılmamış bitüm numunelerine uygulanmıştır. Testler sonucunda kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) değerleri elde edilmiştir. Bu iki değer ile katkısız ve modifiye bitümlerin tekerlek izi direnç parametreleri (G*/Sin δ) hesaplanmıştır. MEUKB'nin bitümlü karışımlar üzerindeki etkisini incelemek üzere Marshall tasarımları ve Nicholson soyulma testleri yapılmıştır. Marshall briketleri 150°C'deki 1150 g bazalta ilave edilen bitümün hızlıca karıştırılması, kalıplara dökülmesi ve her bir yüzeye 75 adet tokmak darbesi vurularak sıkıştırılmasıyla ASTM D1559'a göre üretilmiştir. Marshall briketlerine ait stabilite ölçümleri 60°C'de 2 inç/dakika yükleme hızı ile briketlerin üretiminden bir gün sonra gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar %4,0;

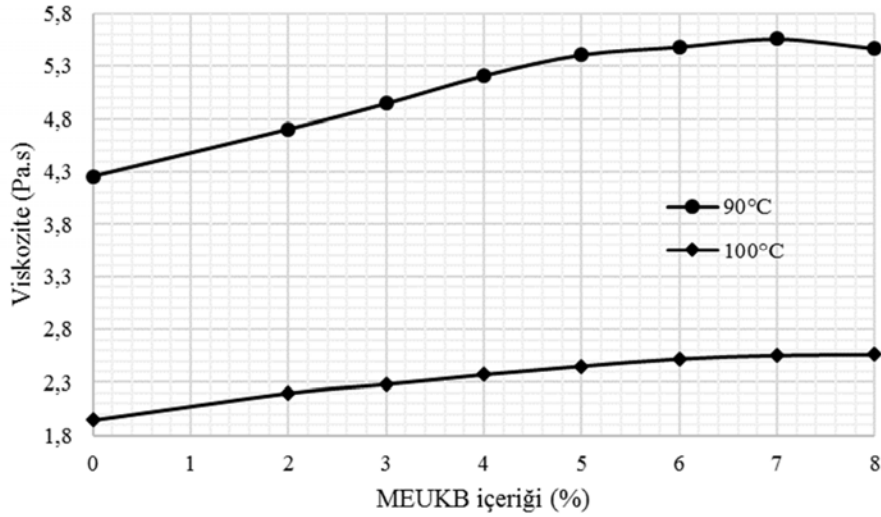
%4,5; %5,0; %5,5 bitüm oranları ile ve her bir bitüm oranında üç adet briket hazırlanarak yapılmıştır. Agregat-bitüm ara yüzeyindeki adezyon kuvveti üzerinde MEUKB'nin etkisi ASTM D1664'e göre uygulanan Nicholson soyulma testi ile gözlenmiştir. Bu test sıkıştırılmamış agregat-bitüm karışımlarına uygulanır. Test numunelerini hazırlamak için 140°C'de ısıtılan 6,3-9,5 mm dane boyutlarındaki bazalt türü agregatdan 100 g alınmış ve yine 140°C'de ısıtılan 5 g bitüm ile cam beher içinde karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 2 adet petri kabına eşit miktarda olacak şekilde boşaltılarak 24 saat 60°C'deki suda bekletilmiştir. Test sonunda numunelerdeki soyulma dirençleri, "soyulma oluşmayan agregat yüzey alanı / toplam agregat yüzey alanı" olarak görsel olarak değerlendirilmiştir.

3. Test Sonuçları ve Tartışma (Test Results and Discussion)

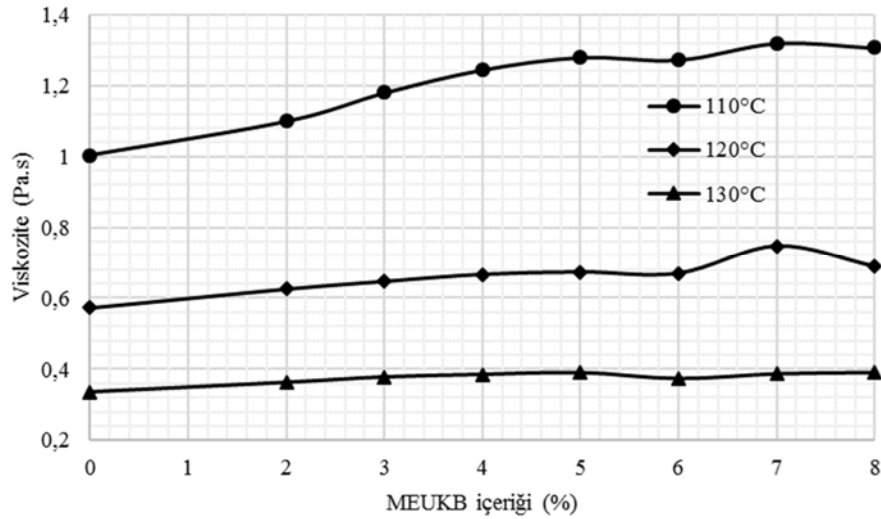
Viskozite, bitümlerin sınıflandırılmasında kullanılan temel testlerden biridir. MEUKB'nin bitümün akışkanlık özelliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için katkısız ve ağırlıkça %2 - %8 arasında değişen oranlarda MEUKB içeren bitümlere viskozite testleri uygulanmıştır.

Testler 90-160°C arasında yapılmış ve sonuçlar Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur.

Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde MEUKB'nin bitüme ait viskozite değerlerini arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda, bitümde MEUKB içeriği arttıkça genel olarak viskozitede daha fazla artış sağlamaktadır. %3 MEUKB ile viskozite artışlar %5,0 ile %17,5 arasında değişirken %8 MEUKB katkılı bitüm ile viskozitede %35,2'ye varan artışlar elde edilmiştir. Tüm sıcaklıklara ait grafikler incelendiğinde, %3 MEUKB konsantrasyonundan sonra viskozite artışları devam etse de viskozite artış hızının bir miktar yavaşladığı görülür. Diğer taraftan 140°C ve 150°C sıcaklıklarda %6 katkı maddesi ilavesi ile lokal geçici köpürmeler gözlemlenmiştir. Viskozitede MEUKB ile meydana gelen artış, bitümde akmaya karşı direncin arttığını ifade eder. Bu tür bitümler sıcak havanın hakim olduğu bölgelerdeki karayolu kaplamalarında tekerlek izi oluşumuna karşı daha çok direnç gösterdiklerinden ötürü tercih edilirler. En bilinen bitüm modifiyerleri arasında olan SBS'nin bitümün viskozitesinde artış sağladığı, aynı zamanda bitümün tekerlek izi



Şekil 2. Katkısız ve MEUKB katkılı bitümlerin 90 ve 100°C'deki viskozite test sonuçları (Viscosity test results of the neat and MEUKB modified bitumens at 90°C and 100°C)



Şekil 3. Katkısız ve MEUKB katkılı bitümlerin 110°C-130°C arasındaki viskozite test sonuçları (Viscosity test results of the neat and MEUKB modified bitumens between 110°C and 130°C)

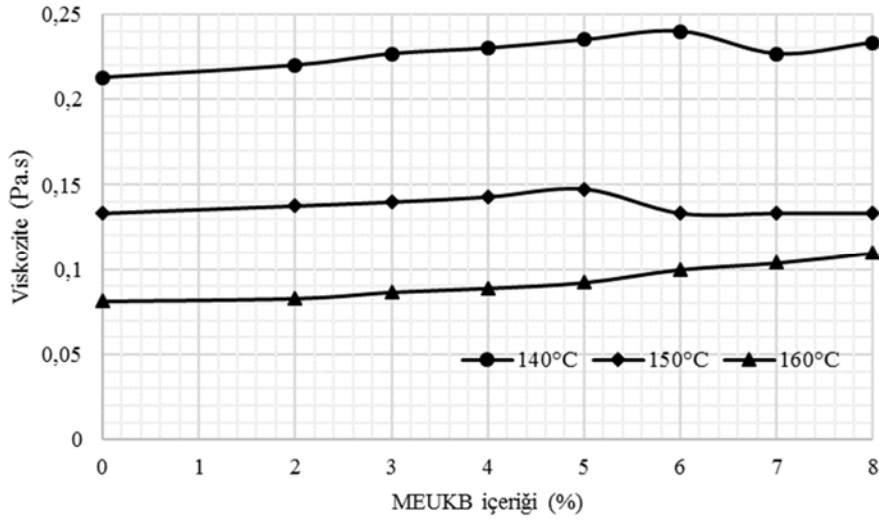
direnç yeteneğini geliştirdiği bilinmektedir [17-20]. Katkı maddesinin içinde inorganik madde olarak uçucu kül yerine bor oksit kullanılarak sentezlenen bileşik de bitümün viskozitesini arttırmıştır [16]. Aynı çalışmada bitüme sadece melas ilave edildiğinde, %5 melas içeriğine kadar viskozitede azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bitümde doğrudan melas yerine, melas ile birlikte uçucu kül ile sentezlenen katkı maddesi kullanılmasıyla bitümün viskozitesinde sürekli bir artış sağlanmıştır.

MEUKB'nin bitümün tekerlek izine karşı direnç yeteneği üzerindeki etkisini doğrudan değerlendirmek için 64°C ve 70°C'de DSR testleri yapılmıştır. Elde edilen kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri Tablo 5'te, bu iki değer kullanılarak hesaplanan tekerlek izi direnç parametreleri ($G^*/\sin \delta$) Şekil 5'te verilmiştir.

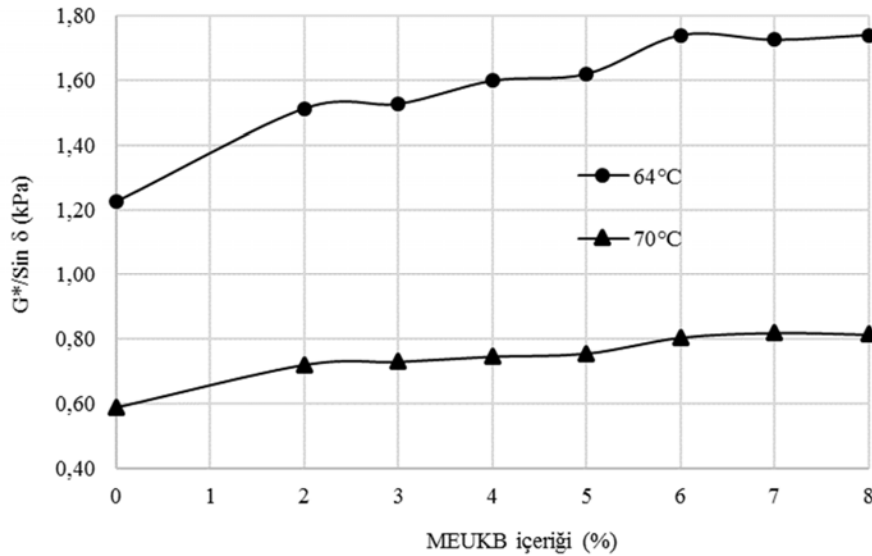
G^* ile kayma gerilmeleri sebebiyle oluşan deformasyona karşı bitümün gösterdiği direnç belirlenir. Faz açısı ise viskoz ve elastik deformasyon ölçüsü olarak değerlendirilir. Faz açısının büyümesi

viskoz davranışı artırırken, küçülmesi ise bitümün elastik davranış özelliğinin arttığını gösterir. Karayolu kaplamasında görülen tekerlek izine karşı direnç bakımından faz açısının küçülmesi yani bitümün elastik davranış göstermesi arzu edilir. Tablo 5 incelendiğinde her iki test sıcaklığında benzer değişimlerin olduğu anlaşılmaktadır. Test bulgularına göre MEUKB faz açısını çok az miktarda azaltsa da elastik davranış üzerinde etkili olmadığı söylenebilir. G^* bakımından ise artan MEUKB içeriği ile bitümün deformasyon direnci genel olarak artmaktadır.

$G^*/\sin \delta$ değeri performans esaslı sınıflandırma sisteminde bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncini göstermekte kullanılan bir parametredir. Daha yüksek $G^*/\sin \delta$ değeri daha yüksek tekerlek izi direnci demektir. Şekil 5'te görüldüğü üzere bitüme ilave edilen MEUKB içeriği arttıkça tekerlek izine karşı direnç iyileşmekte olup viskozite sonuçlarına göre yapılan öngörüyle desteklenmektedir. %3 MEUKB katkılı bitüm ile $G^*/\sin \delta$ değerinde 64°C ve 70°C'deki artışlar sırasıyla %24,4 ve %23,8 olarak tespit edilmiştir. Katkı



Şekil 4. Katkısız ve MEUKB katkılı bitümlerin 140°C-160°C arasındaki viskozite test sonuçları (Viscosity test results of the neat and MEUKB modified bitumens between 140°C and 160°C)



Şekil 5. $G^*/\sin \delta$ değerlerinin MEUKB içeriğine bağlı olarak değişimi. (Variation of $G^*/\sin \delta$ values depending on MEUKB content)

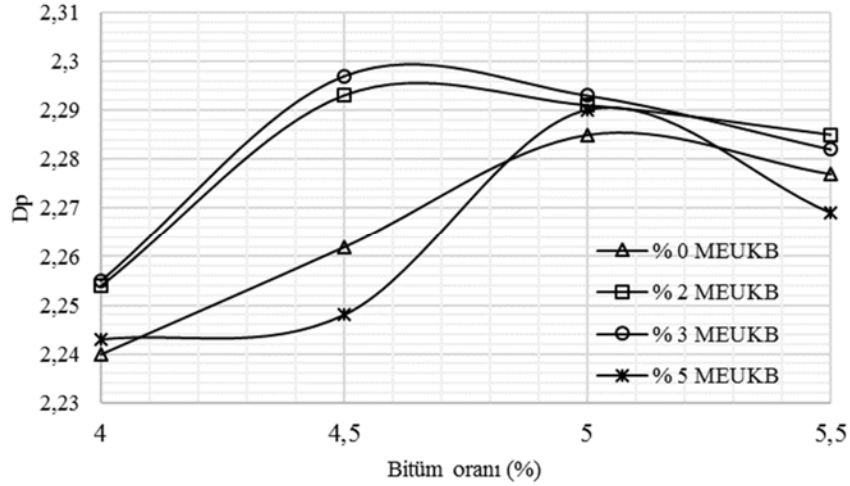
maddesinin daha fazla kullanılması durumunda ise $G^*/\sin \delta$ değerinde 64°C 'de %41,7, 70°C 'de %38,9'a varan artışlar meydana gelmiştir. SBS, EVA, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), EBS gibi polimerlerin bir arada ve/veya ayrı ayrı olarak kullanılmaları [21-24]; polibor bileşikleri [25, 26]; ayrıca kil [27], çimento [28], filler boyutlu agrega [29] gibi inorganik yapı maddeleri, MEUKB'de olduğu gibi, bitümün hem viskozitesini hem de tekerlek izi direncini arttırmaktadır.

Tablo 5. G^* ve δ değerleri. (Values of G^* and δ)

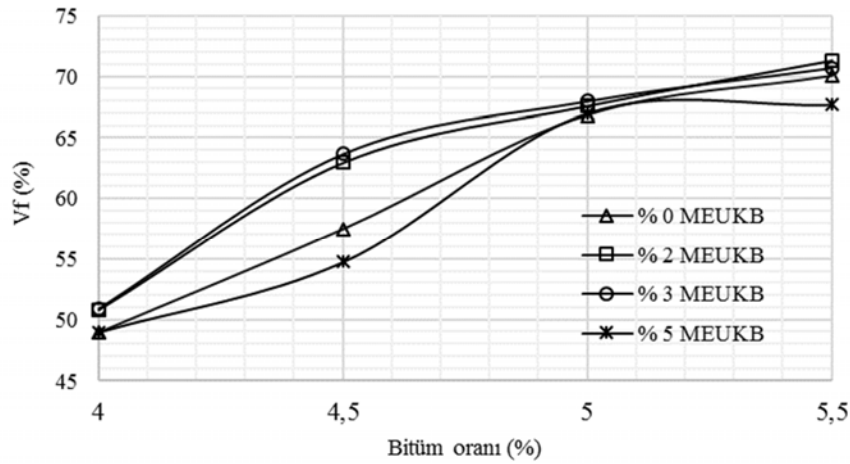
MEUKB içeriği (%)	G^* (kPa)		δ ($^\circ$)	
	64°C	70°C	64°C	70°C
0	1,2242	0,58801	85,69	86,34
2	1,5074	0,71857	85,03	86,11
3	1,5213	0,72772	84,95	86,02
4	1,5921	0,74375	84,81	85,92
5	1,6114	0,75319	84,27	85,95
6	1,7310	0,80217	84,35	86,11
7	1,7154	0,81594	84,05	85,60
8	1,7303	0,81039	84,01	85,33

Katkısız ve MEUKB katkılı bitüm ile Marshall tasarımları yapılarak MEUKB'nin bitümlü karışımların mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. MEUKB'nin bitümlü karışımlardaki pratik yoğunluk (D_p), hava boşluğu (V_h), bitümle dolu boşluk oranı (V_f), stabilite, akma ve agrega daneleri arasındaki boşluk oranı (VMA) üzerindeki etkisi Şekil 6 - Şekil 11 arasında sunulmuştur.

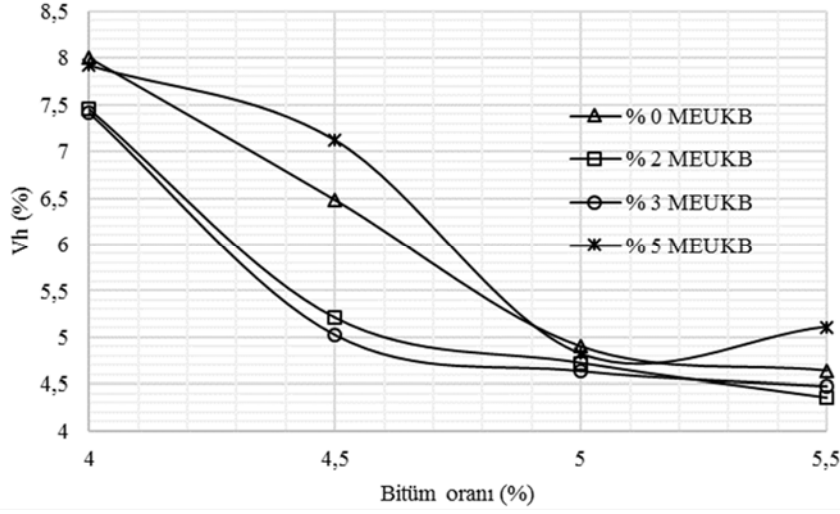
%2 ve %3 MEUKB katkılı bitüm ile karışımın D_p ve V_f değerleri özellikle düşük bitüm oranlarında artmıştır. MEUKB içeriğinin daha fazla artması ise D_p ve V_f 'nin azalmasına yol açmıştır (Şekil 6, şekil 7). V_h -Bitüm oranı grafiğinden görüleceği üzere (Şekil 8), D_p 'deki değişimi destekler biçimde, %2 ve %3 MEUKB ile daha düşük boşluk değerleri elde edilmiştir. Katkısız bitüm ile %4 ve %4,5 bitüm oranlarında 883 kg ve 972 kg'lık stabilite değerleri elde edilmiştir. %2 MEUKB ile %4 ve %4,5 bitüm oranlarında sırasıyla %3,4 ve %8,4'lük stabilite artışları sağlanmıştır. Şekil 9'da görülebileceği üzere en yüksek stabilite artışları %3 MEUKB ile elde edilmiştir. %4 bitüm oranı kullanılan karışımlarda %3 MEUKB katkılı bitüm ile stabilite %3,9 oranında artarak 883 kg'den 917 kg'ye ulaşmıştır. %4,5 bitüm oranı kullanılan karışımlarda ise %3 MEUKB katkılı bitüm ile stabilitede %10,6'luk artış meydana gelmiştir (972 kg'den 1075 kg'ye artmıştır). %5 MEUKB katkılı bitümün stabilitede artış sağlamadığı söylenebilir. Tasarımlara ait bitüm oranına bağlı olarak akma ve VMA



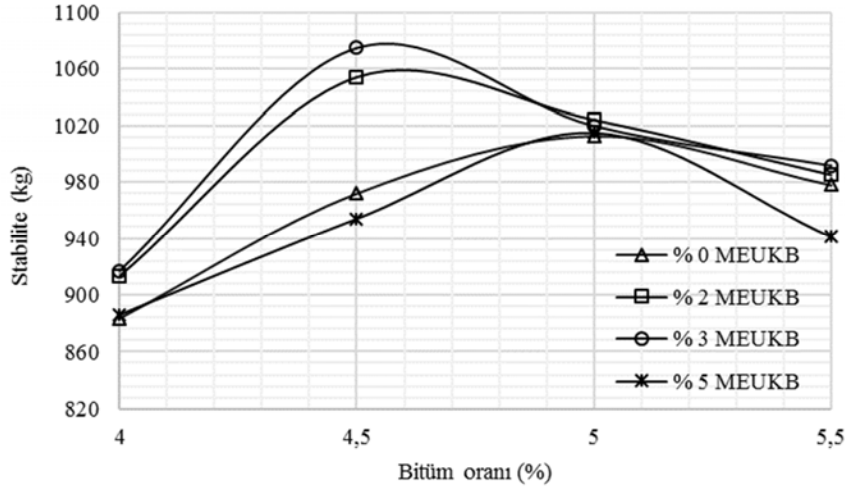
Şekil 6. Katkılı ve katkısız bitümlerde D_p -Bitüm oranı değişimi. (D_p -Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)



Şekil 7. Katkılı ve katkısız bitümlerde V_f -Bitüm oranı değişimi. (V_f -Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)



Şekil 8. Katkılı ve katkısız bitümlerde Vh-Bitüm oranı değişimi. (Vh-Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)



Şekil 9. Katkılı ve katkısız bitümlerde Stabilite-Bitüm oranı değişimi. (Stability-Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)

değişimleri Şekil 10 ve Şekil 11’de sunulmuştur. %2 ve %3 MEUKB ile katkısız bitüme kıyasla daha düşük VMA değerleri elde edilmiştir. Marshall tasarımlarında bekleneceği üzere, bitüm oranı arttıkça akma değerlerinin sürekli olarak arttığı, VMA değerlerinin ise önce azalıp sonra artış gösterdiği görülmektedir.

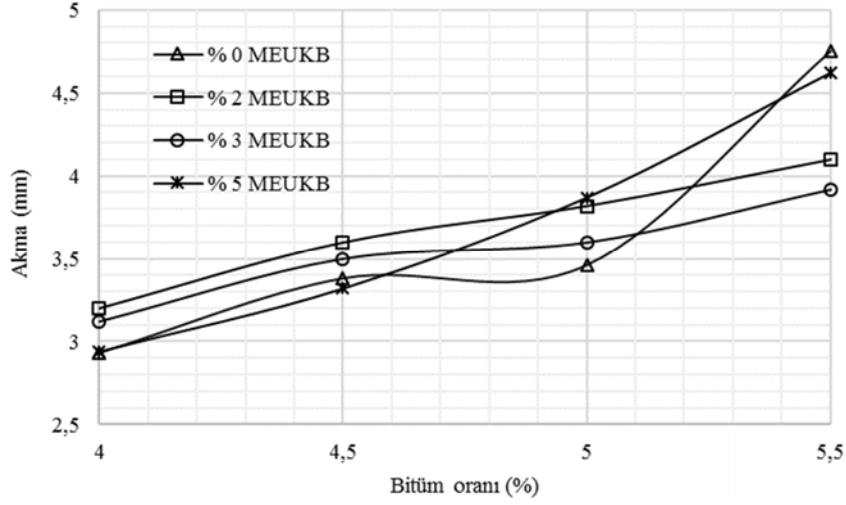
%3 MEUKB ile %4,5 ve %5 bitüm oranlarında elde edilen Marshall tasarım değerleri Tablo 6’da sunulmuştur. Buna göre bitümlü karışım %4,5 oranının çok az üzerinde bağlayıcı kullanılarak %3 MEUKB katkılı bitüm ile imal edildiğinde hem Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) ilgili limit değerlerini sağlayacak hem de katkısız bitüme kıyasla karışımın mekanik özelliklerini geliştirecektir.

Marshall katsayısı (MQ), bitümlü karışıma ait stabilite değerinin akma değerine oranlanmasıyla elde edilir. MQ, bitümlü karışımın kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnci temsil eder. Daha yüksek MQ değeri daha iyi deformasyon direnci anlamına gelir. Şekil 12’de bitümlü karışımlar için hesaplanan MQ değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. %4 bitüm oranı dışındaki değerlerde, en düşük MQ %5 MEUKB ile elde edilmiştir. Bu durum, %5 MEUKB katkılı karışımların deformasyon direncinin görece düşük olduğu anlamına gelir. En yüksek MQ değeri %3 MEUKB ile elde edilmiştir. Daha önce

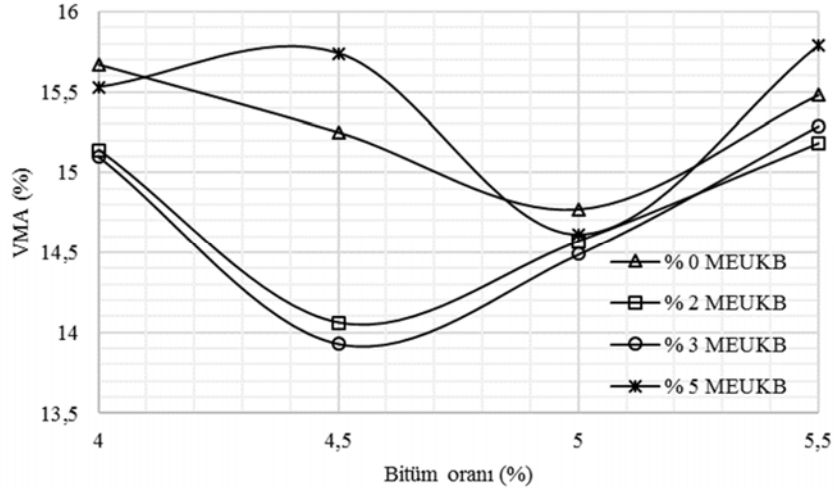
de belirtildiği üzere, %4,5 oranının çok az üzerinde bağlayıcı kullanılarak %3 MEUKB katkılı bitüm ile hazırlanan bitümlü karışım daha rijit bir davranış gösterecek ve deformasyonlara karşı göstereceği direnci daha yüksek olacaktır.

MEUKB’nin bitümlü karışımlardaki soyulma direnci üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere Nicholson soyulma testi yapılmıştır. Katkısız bitüm ve Marshall test sonuçlarına göre en yüksek stabilite sağlayan %3 MEUKB katkılı bitüm teste alınmıştır. Sonuçlar Şekil 13’te sunulmuştur.

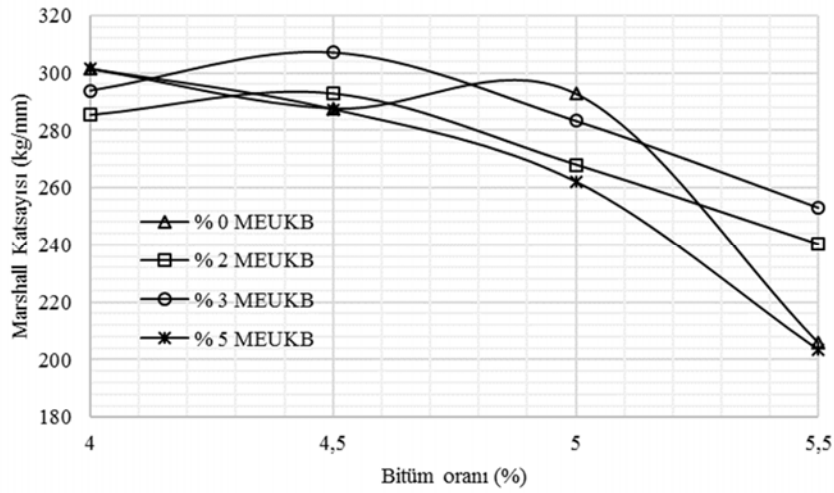
Soyulma direnci %3 MEUKB katkılı bitüm ile %85-90, katkısız bitüm ile %65-70 olarak hem tarafımızca hem de testin uygulandığı Karayolları Genel Müdürlüğü’ne bağlı laboratuvarındaki uzman tarafından belirlenmiştir. Soyulma, agrega ve bitüm arasındaki bağ kuvvetinin (adezyonun) su etkisiyle kopması olarak tanımlanır. Bitümler genellikle düşük miktarda polar özelliğe sahiptirler ve agrega ile aralarındaki bağ esas olarak dispersiyon kuvvetlerinden kaynaklanır. Su ise oldukça polardır ve agrega yüzeyi tarafından bitüme göre daha güçlü çekildiğinden agrega ile su daha kolay bağlanabilir. Bitümlü kaplı agrega suya maruz kaldığında, su bitüm tabakasına sızarak bitümü agregadan ayırabilir [30]. Bu durum



Şekil 10. Katkılı ve katkısız bitümlerde Akma-Bitüm oranı değişimi. (Flow-Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)



Şekil 11. Katkılı ve katkısız bitümlerde VMA-Bitüm oranı değişimi. (VMA-Bitumen ratio variation in bitumens with and without additive)



Şekil 12. Marshall Katsayıları. (Marshall Quotients.)

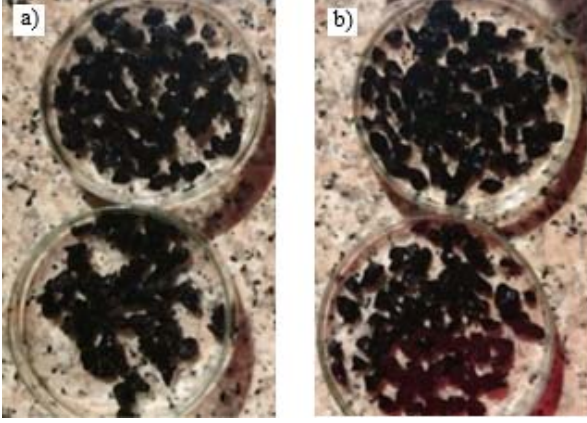
yağışın yoğun olduğu bölgelerdeki karayolu kaplamalarında soyulma türü bozulmaların daha fazla oluşmasına yol açacaktır.%3 MEUKB içeren bitüm ile agrega-bitüm ara yüzeyindeki bağ kuvveti bitümün

adezyon yeteneğinin artmasına bağlı olarak artmıştır. Bu suretle,%3 MEUKB içeren bitüm ile imal edilen agrega-bitüm karışımı suyun meydana getirdiği soyulma etkisine karşı daha fazla direnç

Tablo 6. %3 MEUKB modifiyeli bitüm için %4,5 ve %5 bitüm oranlarındaki Marshall tasarım değerleri. (Marshall design values at bitumen contents of 4.5% and 5% for 3% MEUKB modified bitumen)

	Dp	Stabilite (kg)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Akma (mm)
% 4,5	2,297	1075	5,05	13,91	63,66	3,5
% 5	2,293	1020	4,64	14,49	67,97	3,6

gösterebilecektir. MEUKB'ye benzer şekilde, bitümün apolar yapısında polar yüzeyler oluşturan sentetik metal katkı maddeleri soyulma direncinde önemli artış sağlamışlardır [31-34].



Şekil 13. Nicholson Soyulma test sonuçları: a) Katkısız bitüm ile, b) %3 MEUKB katkılı bitüm ile (Nicholson stripping test results: a) with neat bitumen, b) with 3% MEUKB modified bitumen)

4. Simgeler Ve Kısaltmalar (Symbols And Abbreviations)

G* : Kompleks kayma modülü
 δ : Faz açısı

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

DSR : Dinamik kayma reometresi
 EVA : Etilen-vinil-asetat
 HDPE : Yüksek yoğunluklu polietilen
 LDPE : Düşük yoğunluklu polietilen
 MEUKB : Melas esashi uçucu kül bileşiği
 RV : Rotasyonel viskozite

5. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada laboratuvar ortamında şeker pancarı melası ve uçucu kül kullanılarak MEUKB olarak isimlendirdiğimiz yeni bir katkı maddesi kimyasal olarak sentezlenmiştir. MEUKB ile 50/70 penetrasyonlu bitüm modifiye edilmiştir ve MEUKB'nin bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Bitümün MEUKB ile modifiye edilmesi viskozitesini artırmıştır. Bitümde MEUKB içeriği arttıkça genel olarak viskozitede daha fazla artış sağlanmıştır. Bu artışlar %3 MEUKB ile %17,5'e, %8 MEUKB ile %35,2'ye kadar erişmiştir.
- Bitümün faz açısı (δ) MEUKB modifikasyonundan etkilenmemiştir. Kompleks kayma modülü (G*) ise artış göstermiştir. G*/Sin δ değerinde %41,7'ye varan artışların oluştuğu hesaplanmıştır. Viskozite ve DSR test sonuçlarına göre bitümün hem akmaya hem de deformasyona karşı direncinin arttığı belirlenmiştir. Bu suretle; MEUKB katkılı bitüm, sıcak havanın

hakim olduğu bölgelerde tekerlek izi oluşumuna karşı daha fazla direnç gösterecektir.

- Agregat-bitüm karışımlarının mekanik özellikleri %2 ve %3 MEUKB ile iyileştirilmiştir. Ancak daha yüksek oranda katkı maddesi kullanılması iyi sonuçlar vermemiştir. MEUKB ile bitümlü karışımlarda daha yüksek Dp ve Vf, daha düşük Vh elde edilmiştir. %3 MEUKB katkılı bitümlerin kullanıldığı karışımlarda stabilite değerinde en fazla %10,6'lık artış sağlanmıştır. En büyük Marshall katsayısı %3 MEUKB ile elde edilmiştir.
- Agregat-bitüm karışımlarının soyulmaya karşı direnci %3 MEUKB katkılı bitüm ile %65-70 seviyesinden %85-90'a yükselmiştir. MEUKB, agregat-bitüm ara yüzeyindeki bağ kuvvetini iyileştirmiştir.

Sonuç olarak, %3'e kadar MEUKB ile modifiye edilen bitümlerin kullanıldığı karışımlarla imal edilen karayolu kaplamaları özellikle tekerlek izi olmak üzere deformasyon türü bozulmalara ve yağışın yoğun olduğu bölgelerde daha sık görülebilecek soyulma problemlerine karşı daha fazla direnç gösterecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, Gazi Üniversitesi ve Karayolları Genel Müdürlüğü'ne laboratuvar imkanları için teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

1. Bulatovic V. O., Rek V., Markovic K. J., Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen, *J. Elastomers Plast.*, 46 (5), 448-469, 2014.
2. Xu S., Fan Y., Feng Z., Ke Y., Zhang C., Huang H., Comparison of quantitative determination for SBS content in SBS modified asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 282, 122733, 2021.
3. Słowi M., Thermorheological Properties Of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Copolymer Modified Road Bitumen, *Procedia Eng.*, 208, 145-150, 2017.
4. Karakaş, A. S., Sayin B., Kuloğlu N., The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period, *Constr. Build. Mater.*, 71, 406-415, 2014.
5. Ameli A., Babagoli R., Khabooshani M., Asgari R.A., Jalali F., Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite, *Constr. Build. Mater.*, 239, 117700, 2020.
6. Gürü M., Çubuk M. K., Arslan D., Farzaniyan S. A., Bilici İ., An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material, *J. Hazard. Mater.*, 279, 302-310, 2014.
7. Genet M.B., Sendekie Z.B., Jembere A.L., Investigation and optimization of waste LDPE plastic as a modifier of asphalt mix for highway asphalt: Case of Ethiopian roads, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 4, 100150, 2021.
8. Duan H., Zhu C., Li Y., Zhang H., Zhang S., Xiao F., Amirkhanian S., Effect of crumb rubber percentages and bitumen sources on high-temperature rheological properties of less smell crumb rubber modified bitumen, *Constr. Build. Mater.*, 277, 122248, 2021.
9. Abed A.H., Bahia H.U., Enhancement of permanent deformation resistance of modified asphalt concrete mixtures with nano-high density polyethylene, *Constr. Build. Mater.*, 236, 117604, 2020.
10. Abdelrahman M., Katti D.R., Ghavibazoo A., Upadhyay H.B., Katti K.S., Engineering physical properties of asphalt binders through nanoclay-asphalt interactions, *J. Mater. Civ. Eng.* 26 (12), 04014099, 2014.

11. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Farshbafian F.K., Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1409-1419, 2020.
12. Hareru W., Ghebrab T., Rheological Properties and Application of Molasses Modified Bitumen in Hot Mix Asphalt (HMA), *Applied Sciences*, 10 (6), 1931, 2020.
13. Mounika G., S Sai prasanth BHS, Lakshmi prasanna K., Study on Percentage Replacement of Bitumen with Molasses in Stone Matrix Asphalt, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7 (8), 1315-1317, 2020.
14. Mose GY, Ponnurangam P., Investigating the Effect of Cane Molasses on the Performance of Base Bitumen, *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 3 (6), 54-58, 2018.
15. Gupta U., Juneja D., Partial Replacement of Bitumen with the Sugarcane Waste Molasses, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8 (8), 3330-3334, 2019.
16. Gürü M., Çubuk M.K., Arslan D., Aminbakhsh S., Effects of Sugar Beet Molasses and Molasses-Based Boron Oxide Compound on Bitumen Properties, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29 (4), 04016252, 2017.
17. Cuciniello G., Leandri P., Filippi S., Lo Presti D., Polacco G., Losa M., Airey G., Microstructure and rheological response of laboratory-aged SBS-modified bitumens" *Road Mater. Pavement Des.*, 22 (2), 372-396, 2021.
18. Qian C., Fan W., Yang G., Han L., Xing B., Lv X., Influence of crumb rubber particle size and SBS structure on properties of CR/SBS composite modified asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 235, 117517, 2020.
19. Mielczarek M., Dziadosz S., Slowik M., Bilski M., The assessment of the influence of styrene-butadiene-styrene copolymer on the selected rheological properties characterising durability of modified bitumens used in road pavements, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, 68 (6), 1471-1479, 2020.
20. Airey G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, 82, 1709-1719, 2003.
21. Honga Z., Yan K., Ge D., Wang M., Li G., Li H., Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt, *J. Cleaner Prod.*, 338, 130677, 2022.
22. Jimenez del Barco Carroin A., Subhy A., Angeles Izquierdo Rodriguez M., Lo Presti D., Optimization of liquid rubber modified bitumen for road pavements and roofing applications, *Constr. Build. Mater.*, 249, 118630, 2020.
23. Yan K., Hong Z., You L., Ou J., Miljkovic M., Influence of ethylene-vinyl acetate on the performance improvements of low-density polyethylene-modified bitumen, *J. Cleaner Prod.*, 278, 123865, 2021.
24. Farias L.G.A.T., Leitinho J.L., Amoni B.C., Bastos J.B.S., Soares J.B., Soares S.A., Sant'Ana H.B., Effects of nanoclay and nano composites on bitumen rheological properties, *Constr. Build. Mater.*, 125, 873-883, 2016.
25. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Çubuk M., Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron, *Constr. Build. Mater.*, 25, 3863-3868, 2011.
26. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Preventing of rutting and crackings in the bituminous mixtures by monoethylene and diethylene glycol based synthetic polyboron compounds, *Constr. Build. Mater.*, 50, 102-107, 2014.
27. Ghanoun S.A., Tanzadeh J., Mirsepahi M., Laboratory evaluation of the composition of nano-clay, nano-lime and SBS modifiers on rutting resistance of asphalt binder, *Constr. Build. Mater.*, 238, 117592, 2020.
28. Al-khateeb G.G., Al-Akhras N.M., Properties of portland cement-modified asphalt binder using Superpave tests, *Constr. Build. Mater.*, 25, 926-932, 2011.
29. Lagos-Varas M., Movilla-Quesada D., Raposerias A.C., Arenas J.P., Calzade-Perez M.A., Vega-Zamanillo A., Lastra-Gonzales P., Influence of limestone filler on the rheological properties of bituminous mastics through susceptibility master curves, *Constr. Build. Mater.*, 231, 117126, 2020.
30. Whiteoak D., *Shell Bitüm El Kitabı*, Abdullah Hilmi Lav, M. Ayşen Lav, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2004.
31. 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.
32. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Improvement of hot mix asphalt performance in cold regions by organic-based synthetic compounds, *Cold Regions Science and Technology*, 85, 250-255, 2013.
33. Çubuk M., Gürü M., Çubuk M.K., Arslan D., Improvement of properties of bitumen by organic-based Magnesium additive, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (2), 257-264, 2013.
34. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens, *Fuel*, 766-772, 2012.

