



Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen

Deniz Arslan^{*1}, Metin Gürü², M. Kürşat Çubuk³, Meltem Çubuk⁴, Farshad Karimzadeh Farshbafian³

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

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

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

⁴Ministry of Transport and Infrastructure, 06500, Emek, Ankara, Turkey

Highlights:

- Kaolin modified bitumen
- Effects of kaolin on rheological properties of bitumen
- Effect of kaolin on mechanical properties of bituminous mixtures

Keywords:

- Bitumen
- Modified Bitumen
- Kaolin
- Rheology
- Marshall Design

Article Info:

Research Article
Received: 21.09.2018
Accepted: 01.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.462598

Acknowledgement:

Gazi University is acknowledged for the laboratory facilities

Correspondence:

Author: Deniz Arslan
e-mail:
denizarslan_mmf@hotmail.com
phone: +90 332 223 2664

Graphical/Tabular Abstract

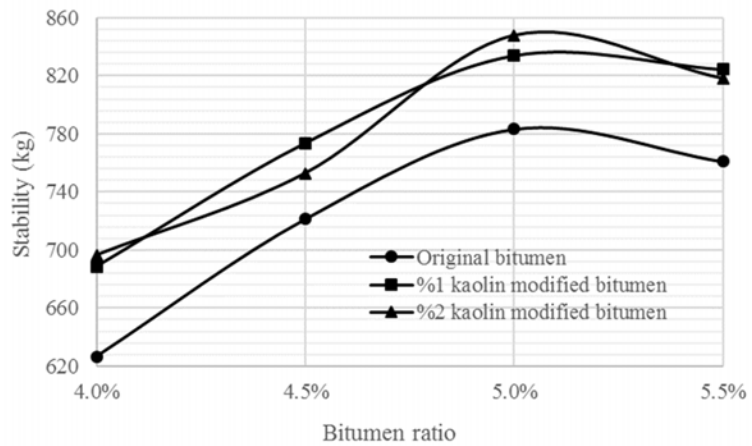


Figure A. Kaolin effect on Marshall Stability

Purpose: The purpose of this study was to investigate the effects of kaolin on both the rheological properties of bitumen and the mechanical properties of bituminous mixtures.

Theory and Methods:

The experimental methods used for the rheological examination of bitumen properties were rotational viscosity, penetration, softening point and ductility tests. Nicholson stripping and Marshall tests were applied on the bituminous mixtures for the mechanical evaluation.

Results:

Viscosity, softening point and penetration index values of the bitumen were increased while ductility value was decreased with kaolin. Enhancement in Marshall Stability values were reached to 11.2 % with kaolin-modified bitumen.

Conclusion:

Bitumen rheology was found to be improved for hot climate conditions. Marshall properties of the mixtures were also found to be improved. It could be concluded on the basis of the findings that kaolin modified bitumen might improve performance of flexible pavements especially where high temperature is dominant.



Kaolin kili ile modifiye edilmiş bitümün reolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Deniz Arslan*¹, Metin Gürü², M. Kürşat Çubuk³, Meltem Çubuk⁴, Farshad Karimzadeh Farshbafian³

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

⁴Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 06500, Emek, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kaolin katkılı bitüm
- Bitümün reolojik özellikleri üzerinde kaolinin etkileri
- Bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerinde kaolinin etkileri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.09.2018

Kabul: 01.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.462598

Anahtar Kelimeler:

Bitüm,
modifiye bitüm,
kaolin,
reoloji,
marshall tasarımı

ÖZET

Bu çalışmada; 50/70 penetrasyon dereceli bitüm, granit kayalardan elde edilen bir kil türü olan ve Türkiye’de arı kil olarak bilinen kaolin ilave edilerek modifiye edilmiştir. %1 ile %4 arasında değişen oranlarda ilave edilen kaolin ile bitümün reolojik özelliklerinde meydana gelen değişim rotasyonel viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite testleri ile incelenmiştir. Kaolin ile bitümün viskozitesinin ve yumuşama noktasının arttığı, penetrasyonunun azaldığı belirlenmiştir. Penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları ile bitümlere ait penetrasyon indeks (PI) değerleri hesaplanmış ve kaolin ile PI değerlerinde artma meydana geldiği görülmüştür. Kaolinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi ise Nicholson soyulma ve Marshall testleri ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, kaolin katkılı bitüm ile Marshall Stabilite değerinde %11,2’ye ulaşan artışlar elde edildiğini göstermiştir.

Investigation of rheological and mechanical properties of kaolin-clay modified bitumen

H I G H L I G H T S

- Kaolin modified bitumen
- Effects of kaolin on rheological properties of bitumen
- Effect of kaolin on mechanical properties of bituminous mixtures

Article Info

Research Article

Received: 21.09.2018

Accepted: 01.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.462598

Keywords:

Bitumen,
modified bitumen,
kaolin,
rheology,
marshall design

ABSTRACT

In this study, 50/70 penetration grade bitumen has been modified by the addition of kaolin which is a kind of clay obtained from granite rocks and which is known as pure clay in Turkey. The changes in rheological properties of bitumen with the addition of kaolin, varying between ratios of 1% to 4%, have been examined through rotational viscosity, penetration, softening point and ductility tests. It was determined that the addition of kaolin increased viscosity and softening point and decreased penetration of the bitumen. The penetration index (PI) values of bitumens were calculated through penetration and softening point results, and kaolin was found to increase PI values. The effects of kaolin on mechanical properties were evaluated by Nicholson stripping and Marshall tests. The test results showed that enhancement in Marshall Stability values were reached to 11.2% with kaolin-modified bitumen.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: denizarslan_mmf@hotmail.com, mguru@gazi.edu.tr, ckursat@gazi.edu.tr, melcubuk@yahoo.com, farshad.karimzadeh@gmail.com / Tel: +90 332 223 2664

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bitüm, doğal olarak veya ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilir. Üretim yöntemlerinde farklı teknikler kullanılabilir. Elde edildiği petrol kaynağı ve üretim tekniklerindeki farklılıklara bağlı olarak bitümün kimyasal ve fiziksel özellikleri değişkenlik gösterir. Kimyasal yapıları oldukça karmaşık olup büyük oranda hidrokarbonlardan oluşur. En temel fiziksel özelliği kıvamdır. Bitümler kıvamlarına (penetrasyon veya viskozite) veya daha yeni bir yöntem olan performans (Superpave) sistemine göre sınıflandırılır. Katı bitümler sıcak iklimlerde avantaj sağlarken soğuk havanın hakim olduğu bölgelerde yumuşak bitümler tercih edilir. Bitümün başlıca kullanım alanı esnek üstyapı olarak adlandırılan karayolu kaplamalarıdır. Katı bitüm kullanılan esnek üstyapıların tekerlek izi oluşumlarına karşı dirençleri daha fazladır. Yumuşak bitümler ise yüksek süneklik özellikleri ile esnek üstyapılarda düşük hava sıcaklıklarında meydana gelen çatlamların daha az olmasına imkan sağlar. Bunların yanı sıra, yorulma çatlakları ve adezyon yetersizliklerinde bitüm özellikleri önemli rol oynar. Esnek üstyapılarda bağlayıcı olarak kullanılan bitümün sahip olduğu mühendislik özelliklerinin üstyapı performansını doğrudan etkilemesi, bitümün özelliklerini geliştirmek üzere çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilmesini güncel bir araştırma alanı haline getirmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar modifikasyonda kullanılan katkı maddesinin cinsi, miktarı ve modifikasyon prosesi değişikçe bitüm ve dolayısıyla da karışım özelliklerinin farklı şekilde değiştiğini göstermektedir. Örneğin, bir çeşit kauçuk olan Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ile modifiye edilen bitümün viskozitesi ve yumuşama noktası artmakta, penetrasyonu azalmaktadır. İlave edilen SBS oranı arttıkça bitümün belirtilen özelliklerindeki değişimler daha da fazlaşmaktadır [1]. Bu tür bitüm kullanılan karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençleri ve Marshall stabilite değerleri artmaktadır [2, 3]. Hizmet ömrünü kısa sürede tamamlayan ve doğada hızlıca atık haline dönüşen araç lastikleri çevresel problemlere sebep olur. Bu lastikler kauçuk içerdiğinden dolayı bitümde veya bitümlü karışımlarda katkı maddesi olarak kullanılmaları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Atık araç lastiklerinden elde edilen kırıntı formu kauçuk ile bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetinin azaldığı [4], tekerlek izi ve yorulma dirençlerinin arttığı [5], bitümlü karışımların ise yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyon dirençlerinin ve düşük sıcaklıkta çatlama dirençlerinin önemli derecede etkilendiği görülmüştür [6]. Stiren-Butadien-Kauçuk (SBR)'nin de bitüm özelliklerini etkilediği belirlenmiştir. [7]. Plastikler, bitüm modifikasyonunda kullanılan diğer bir malzeme türüdür. Bunlar arasında en bilineni Etilen-Vinil-Asetat (EVA)'dır. EVA ile modifiye edilen bitümlerin sıcaklığa olan duyarlılığı azalmakta ve tekerlek izi oluşumuna karşı dirençleri artmaktadır [8]. EVA ile bitümlü karışımların Marshall Stabilite değerinde artış elde edildiği gibi [9] azalmaların da [10] meydana geldiği bildirilmiştir. Plastik grubuna dahil olan Polietilen (PE) ile yapılan çalışmalarda düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ile bitümün tekerlek izi

direncinin arttığı ancak düşük sıcaklıklarda çatlama direncinde azalma olduğu tespit edilmiştir [11]. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ise bitümün penetrasyon indeksi (PI) değerinde ve bitümlü karışımların Marshall Stabilitesinde artış meydana getirmiştir [12]. Termoplastik polimer olan politetrafloretilen (PTFE) ile bitümün camı geçiş sıcaklığında artma, yüzey enerjisinde ise dalgalanma meydana gelmiş ve %3 oranında PTFE ile modifiye edilen bitümün tekerlek izi direncinde önemli oranda yükselme olduğu görülmüştür [13]. Bitümlü karışımlarda su etkisiyle oluşan soyulmaların (adezyonda yetersizlik) ve düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamların organik esaslı metal bileşiği içeren bitüm ile azaldığı belirlenmiştir [14-16].

Son yıllarda bitüm ve/veya bitümlü karışımların performansını arttırmak üzere katkı malzemesi olarak kil kullanımı üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekicidir. Killerin bitüm ve karışım özellikleri üzerinde önemli değişimler meydana getirdiği belirlenmiştir. Bu değişimlerde kil mineraline ait yüzey alanı faktörünün önemli bir etken olduğu ifade edilmiştir [17]. Makro ve nano boyutlu killerle yapılan çalışmada bitüm kıvamının arttığı [18], bentonit kilinin bitümün düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlama, tekerlek izi ve yaşlanma direncini arttırdığı [19, 20] görülmüştür. Nano kil ile modifiye edilmiş bitüm kullanıldığında karışımın suyun meydana getirdiği bozulmalara karşı daha dirençli olduğu belirtilmiştir [21]. Bitümde birden fazla katkı maddesinin bir arada kullanılması da mümkündür. Böyle bir araştırmada SBS modifiyeli bitümün yaşlanmaya karşı direncinin montmorillonit kili ile arttığı tespit edilmiştir [22]. SBS modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklıkta uzun süre depolanması ile oluşan faz ayrışması problemi montmorillonit kilinden elde edilmiş ticari bir ürün olan Cloisite ile azaldığı rapor edilmiştir [23]. Nano boyutlu montmorillonit kili ile bitümün sıcaklığa olan duyarlılığının azalarak tekerlek izi direnci parametre değerinin arttığı belirtilmiştir [8]. Montmorillonit ile bitümün yaşlanma direncinin de arttığı tespit edilmiştir [24]. Kaolin kilinin bitüm ve bitümlü karışımlardaki etkisinin incelendiği çalışmalar literatürde sınırlı sayıdadır. Böyle bir çalışmada makro boyutlu kireçtaşı, tebeşir tozu, hidrotermal kuvars ve kaolin filler olarak bitüme ayrı ayrı ilave edilmiştir. Diğerlerine göre daha yüksek boşluk konsantrasyonuna ve yüzey alanına sahip kaolin ile daha yüksek yumuşama noktası, viskozite ve penetrasyon indeksi değerleri elde edildiği belirtilmiştir [17]. Ancak bu çalışmada bitüme ilave edilen kaolin miktarı oldukça yüksektir (bitüm ağırlığının yaklaşık 1,5 katı). Ayrıca kaolin katkılı bitümün karayolu kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılması durumunda agrega-bitüm karışım özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmemiştir. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılacak modifiye bitümlerde bu çalışmada olduğu kadar yüksek oranda katkı maddesi kullanılmadığı bilinmektedir. Kaolin ile yapılan diğer bir çalışmada ise doğal agrega kaynaklarının daha az tüketilmesi ve kaoline alternatif bir kullanım alanı oluşturabilmek üzere bitüm-agrega karışımlarında kaolinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla; kaolin, geleneksel olarak

kullanılan agreganın yerine belirli oranlarda (%5 ile %40 arasında değişen) kullanılmıştır. Çalışma bulgularında kaolinin geleneksel olarak kullanılan agregaya ile yer değiştirilmesiyle imal edilen bitümlü karışımlarda yoğunluğun ve bitümle dolu boşluk oranının azaldığı, boşluk oranının ve stabilitenin arttığı tespit edilmiştir [25]. Araştırmada, kaolin kilinin bitümü modifiye etmekten ziyade bitümlü karışımda agregaya olarak kullanıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada; 50/70 penetrasyon dereceli bitüm, granit kayalardan elde edilen bir kil türü olan kaolin ilave edilerek modifiye edilmiştir. Kaolin modifiye bitümler, literatürdeki ilgili çalışmalardan farklı olarak bitüm ağırlığının %1'i ile %4'ü arasında değişen oranlarda kaolin ilave edilerek ve "ıslak proses" yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Bitümün kaolin ile modifiye edilmesiyle reolojik özelliklerinde meydana gelen değişimler rotasyonel viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite testleriyle ve penetrasyon indeks değerlerinin hesaplanmasıyla incelenmiştir. Karayolu kaplaması olarak kullanılacak olan bitüm-agrega karışımlarının mekanik özellikleri üzerinde kaolin modifikasyonun etkisi ise Nicholson soyulma ve Marshall testleri ile araştırılmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Bitüm ve Agregaya (Bitumen and Aggregate)

Çalışmada Kırıkkale rafinerisinden temin edilen ve özellikleri Tablo 1'de sunulmuş olan 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır.

Tablo 1. 50/70 penetrasyon dereceli bitümün özellikleri
(Characteristics of the 50/70 penetration grade bitumen)

Özellik	Değer
Penetrasyon (25°C, 100 g, 5 s)	52 dmm (0,1 mm)
Yumuşama noktası	50°C
Viskozite, 130°C	0,40 Pa.s
Viskozite, 140°C	0,24 Pa.s
Özgül ağırlık, 25°C	1,04

Marshall dizaynı ve Nicholson soyulma testleri için hazırlanan bitümlü karışımlarda bazalt türü agregaya kullanılmıştır. Agregaya, Ankara/Kızılcahamam ocağından alınmıştır. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri Tablo 2'de,

Tablo 2. Agregaya ait özgül ağırlık değerleri (Specific gravity values of the aggregate)

	Kaba Agregaya	İnce Agregaya	Filler
Hacim Özgül Ağırlık	2,678	2,770	-
Zahiri Özgül Ağırlık	2,709	2,790	2,838

Tablo 3. Marshall briketlerinde kullanılan agregaya 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	91,5	80	47,5	31,5	15	10,5	7

Marshall briketlerinde kullanılan agregaya gradasyonu Tablo 3'te verilmiştir.

2.2. Katkı Maddesi (Additive Material)

Çalışmada, bitümü modifiye etmek üzere beyaz ve yumuşak bir toprak türü olan kaolin kullanılmıştır. Ülkemizde arı kil olarak da bilinen ve dünyaca ünlü Çin porselenlerinin yapı maddesi olan kaolin granit kayalardan elde edilen bir kil türüdür. Kaolin etüvde kurutulduktan sonra öğütülerek toz hale getirilmiştir. Toz halindeki kaolin 200 no.'lu elekten geçirildikten sonra yine kurutulmuş çalışmada katkı maddesi olarak kullanılan kaolin elde edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kaolin (Kaolin)

2.3. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması (Preparation of Modified Bitumens)

Kaolin katkılı modifiye bitüm üretimi, orijinal bitüm ve kaolinin 120°C'de 20 dakika süreyle 1300 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Modifiye bitümlerde %1 ile %4 arasında değişen kaolin oranları kullanılmıştır. Etüvde teneke kap içerisinde 120°C'de ısıtılan orijinal bitüme belirtilen oranlarda (%1, %2, %3, %4) kaolin ilave edilmiş ve hemen ardından mekanik karıştırıcı ile karıştırma işlemine geçilmiştir. 20 dakikalık bu süreçte sıcaklık kaybını önlemek üzere karıştırma işlemi 120°C'ye ayarlanmış yağ banyosu içerisinde yapılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler oda sıcaklığında soğutulduktan sonra teneke kapların ağızları kapatılmıştır.

2.4. Metot (Method)

Kaolinin bitüm özelliklerine olan etkisi rotasyonal viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, Nicholson soyulma ve Marshall testleri ile incelenmiştir. Penetrasyon ve yumuşama test sonuçları ile bitümlerin PI değerleri hesaplanmıştır. Rotasyonal viskozite testi, performans esaslı bitüm sınıflandırma sistemi olarak ABD’de geliştirilen Superpave test grubuna dahil olup çalışmadaki orijinal ve modifiye bitümlere ait rotasyonal viskozite değerleri 90°C-160°C arasında sekiz farklı sıcaklıkta ölçülmüştür. Ölçümler DV-III reometre ve 29 no.’lu uç (spindle) kullanılarak ASTM D-4402’ye göre gerçekleştirilmiştir. Penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite testleri sırasıyla ASTM D-5, ASTM D-36, ASTM D-113’e göre yapılmıştır. Penetrasyon testinde 25°C’deki bitüme 100 gramlık standart yük 5 saniye süreyle uygulanmış ve penetrasyon iğnesinin bitüm içine dikey olarak battığı mesafe 0,1 mm (dmm) cinsinden bulunmuştur. Yumuşama noktası ölçümlerinde EL46-4502 model cihaz kullanılmış ve bitümün sıcaklığa olan duyarlılığının kaolin ile değişimi incelenmiştir. Düktilite ölçümlerinde numunelerde kopmanın oluşabilmesi için test sıcaklığı 15°C olarak ayarlanmıştır. 50 mm/dakika çekme hızı ile gerçekleştirilen düktilite testlerinde bitüm numunelerinin kopma anındaki uzama miktarları belirlenmiştir. Orijinal ve modifiye bitümlere ait PI değerleri (1) no.’lu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log(\text{Pen}_{25^\circ\text{C}}) - 20 \cdot \text{YN}}{50 \cdot \log(\text{Pen}_{25^\circ\text{C}}) - \text{YN} - 120} \quad (1)$$

Burada;

$\text{Pen}_{25^\circ\text{C}}$: Bitüm numunesine ait 25°C’deki penetrasyon değeri (dmm)

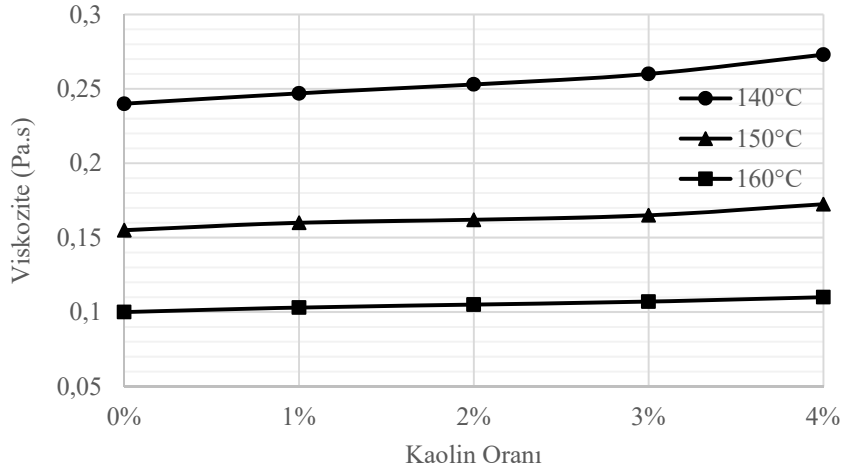
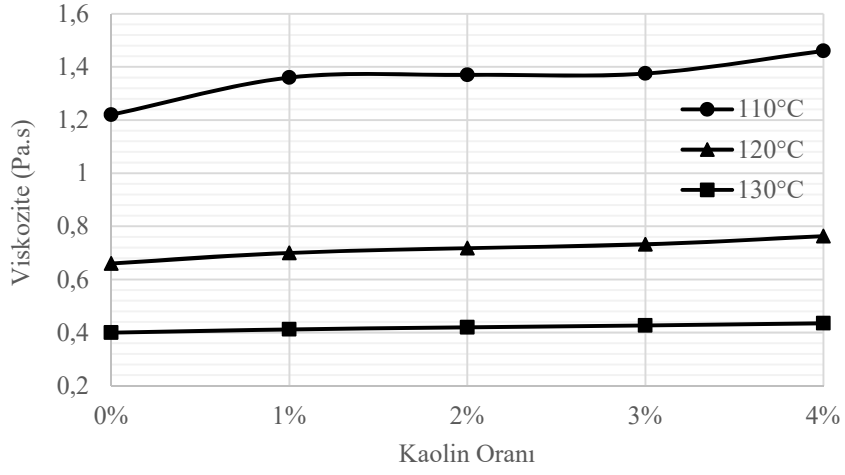
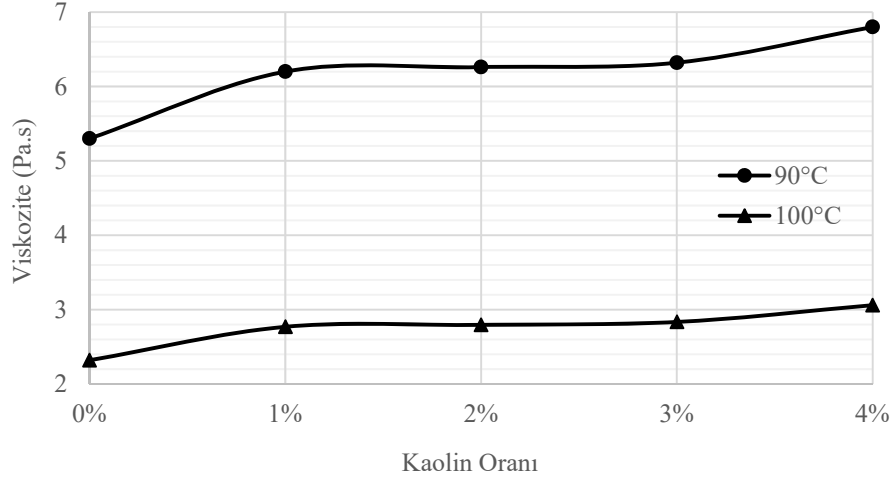
YN : Bitüm numunesine ait yumuşama noktası değeri (°C)

Nicholson soyulma testleri ASTM D-1664’e göre uygulanmıştır. Testlerde 9,5-4,75 mm boyut aralığındaki bazalt türü agrega kullanılmıştır. Agrega yıkanmış ve 110°C’lik etüvde kurutulmuştur. 100 g agrega ve 5 g bitüm (orijinal bitüm veya kaolin modifiye bitüm) 110°C’de karıştırılmış ve elde edilen bitümlü karışım eşit miktarda olacak şekilde 2 petri kabına dağıtılarak teste tabii tutulacak sıkıştırılmamış numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat boyunca 60°C’ye ayarlanmış etüvde su içerisinde bekletilmiştir. 24 saat sonunda numunelerde meydana gelen soyulmalar gözlenerek soyulmaya karşı göstermiş oldukları dirençler tespit edilmiştir. Marshall dizaynı orijinal ve modifiye bitüm içeren karışımlara ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir farklı bitüm türü ile (orijinal bitüm ve farklı oranlarda kaolin içeren modifiye bitümler) ASTM D-1559’a göre Marshall dizaynı yapılarak kaolin modifikasyonunun bitümlü karışımın fiziksel özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Marshall briketleri Tablo 3’teki gradasyon özelliklerini sağlayan 1150 g bazalt türü agrega ile farklı bitüm içerikleri için 3’er tane hazırlanmıştır. Sıkıştırma işleminde briketlerin her iki yüzüne Marshall tokmağı (EL45-6600) ile 75’er darbe vurulmuştur. Marshall

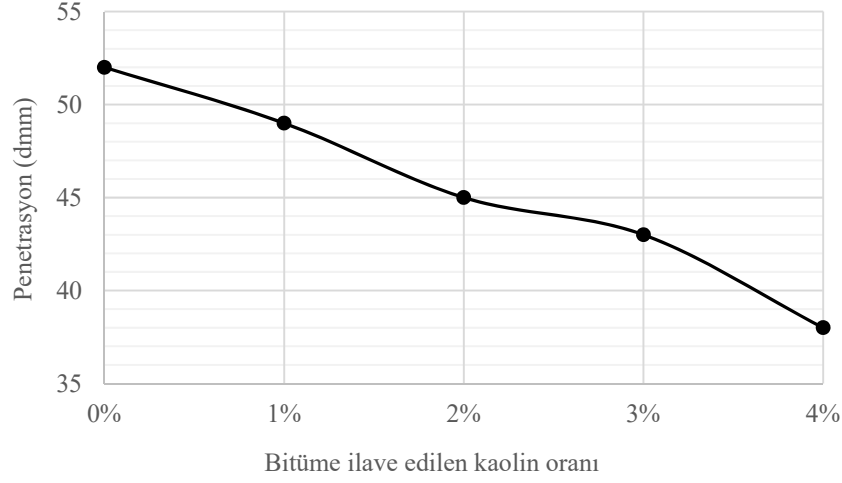
briketleri imal edildikten 1 gün sonra havada, suda, suya doymun-yüzey kuru ağırlıkları ölçüldükten sonra 60°C’deki su banyosunda 30 dakika bekletilmişler ve hemen sonrasında briketlere yükleme (kırama) işlemi uygulanmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

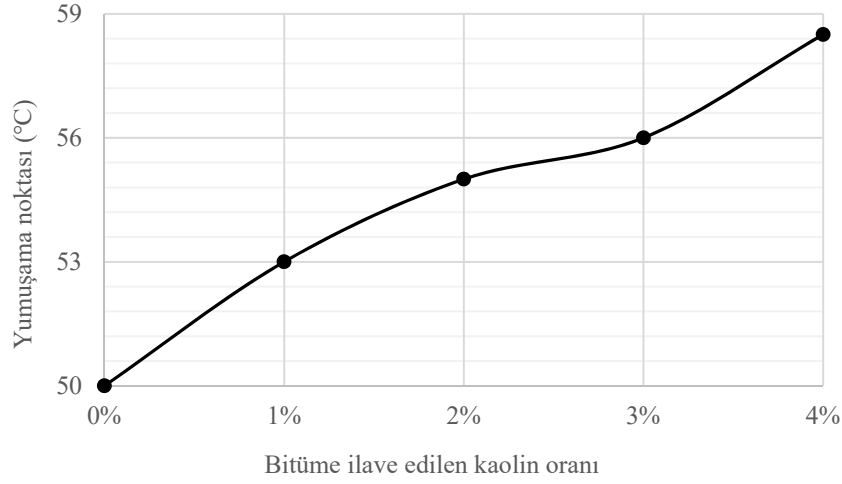
Kaolin modifikasyonu ile bitümde meydana gelen değişim öncelikle rotasyonal viskozite testleriyle incelenmiştir. Viskozite için farklı ölçüm teknikleri ve cihazları mevcut olmakla beraber çalışma kapsamındaki viskozite ölçümleri Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO) test grubuna dahil olan ve hassas ölçüm değerleri sağlayan rotasyonal viskozite tekniği ile 90°C-160°C arasında uygulanmıştır. Kaolin ilavesiyle viskozitede meydana gelen değişimler Şekil 2a, Şekil 2b ve Şekil 2c’de sunulmuştur. Şekil 2a, Şekil 2b ve Şekil 2c incelendiğinde kaolinin bitüm viskozitesini arttırdığı görülmektedir. Test sıcaklıklarının tümünde kaolin ilavesi ile orijinal bitümün viskozitesi artmıştır. Artış oranı 100°C’de %31,9’a kadar ulaşmıştır (2,32 Pa.s’den 3,06 Pa.s’ye artmıştır). Test sonuçları farklı sıcaklıklar için ayrı ayrı incelendiğinde bitüme ilave edilen kaolin oranının artmasıyla viskozitenin daha çok arttığı da anlaşılmaktadır. Benzer durum Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) ve kırıntı formülü kauçuk katkılı bitümlerde de elde edilmiştir [4, 26]. Bunlarla birlikte, sıcaklığın artmasıyla kaolinin viskozite üzerindeki etkisinin azaldığı Şekil 2a, Şekil 2b ve Şekil 2c’den tespit edilebilir. Örneğin, 90°C ve 100°C’lerde %4 oranında kaolin ilavesiyle orijinal bitümün viskozitesi sırasıyla %28,3 ve %31,9 oranlarında artarken 150°C ve 160°C’lerde bu artış sırasıyla %11,3 ve %10’a gerilemektedir (160°C’de 0,1 Pa.s’lik orijinal bitüm viskozitesi %4 kaolin ilavesiyle 0,11 Pa.s’ye artmıştır). Bu durum bitümlü sıcak karışım (bsk) üretiminde modifiye bitüm kullanılması durumunda sıcaklığın daha çok artırılmasının önüne geçecek olup; bu suretle üretim esnasında bitümün yaşlanması, enerji sarfıyatı ve emisyon bakımından meydana gelecek olumsuzlukların daha fazla artmasını önleyecektir. Bilindiği üzere bitümün 0,2 Pa.s’lik viskoziteye sahip olduğu sıcaklığın bsk üretim sıcaklığı olarak belirlenmesi uygun görülmektedir [27]. Literatürde özellikle SBS modifiye bitüm ile bsk üretiminde sıcaklığın arttırıldığı çalışmalar mevcuttur [4]. Orijinal ve kaolin katkılı bitümlere ait penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4’te, düktilite test sonuçları Tablo 4’te sunulmuştur. Bitüme ilave edilen kaolin oranının artmasıyla penetrasyon ve düktilite azalmakta, yumuşama noktası artmaktadır (Şekil 3 ve Şekil 4, Tablo 4). Penetrasyonun azalması ve yumuşama noktasının artması bitüm kıvamının kaolin ile arttığını yani kaolinin bitümü fiziksel olarak sertleştirdiğini gösterir. Bu sonuçlar kaolin ilavesiyle elde edilen viskozite artışlarıyla da uyumludur. Penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçlarına göre hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) değerlerine göre (Tablo 5) kaolin ile bitümün PI değerinin arttığı başka bir ifadeyle kaolin ile bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığının azaldığı anlaşılmaktadır. Kaolinin bitümün PI değerini arttırmada etkili olduğu literatür tarafından da desteklenmektedir [17].



Şekil 2 a) Viskozitenin kaolin oranına bağlı olarak değişimi (90°C ve 100°C'de) b) Viskozitenin kaolin oranına bağlı olarak değişimi (110°C-130°C arasında) c) Viskozitenin kaolin oranına bağlı olarak değişimi (140°C-160°C arasında).
(a) Variation of viscosity with respect to kaolin ratio (at 90°C and 100°C) b) Variation of viscosity with respect to kaolin ratio (between 110°C-130°C) c) Variation of viscosity with respect to kaolin ratio (between 140°C-160°C)



Şekil 3. Penetrasyon test sonuçları (Penetration test results)



Şekil 4. Yumuşama noktası test sonuçları (Softening point test results)

Tablo 4. Düktilite test sonuçları (Ductility test results)

Bitüme ilave edilen kaolin oranı (%)	Düktilite değeri (cm)
0	100+
1	83
2	65
3	59
4	50

Tablo 5. PI değerleri (PI values)

Bitüme ilave edilen kaolin oranı (%)	Bitümün PI değeri
0	-1,12
1	-0,53
2	-0,28
3	-0,16
4	0,08

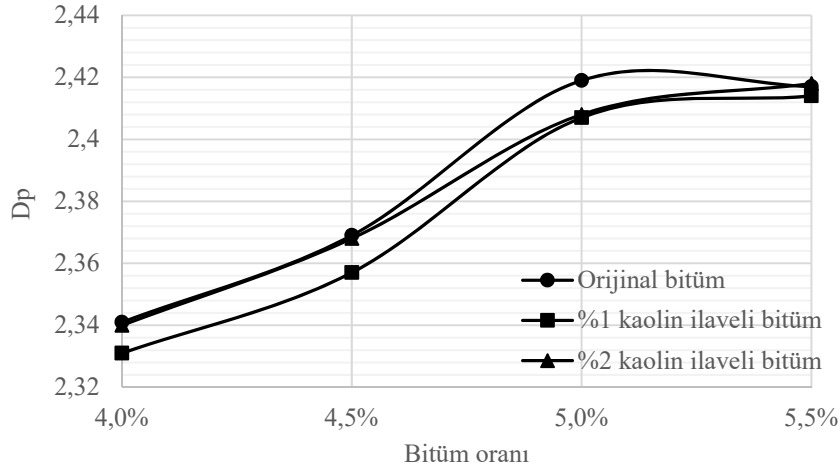
Viskozite, yumuşama noktası, PI değerlerinin artması; kaolin ile modifiye edilmiş bitümün (SBS modifiye bitüm

gibi) hava sıcaklığının yüksek olduğu bölgeler için daha uygun olabileceğini gösterir niteliktedir. SBS modifiye bitüm özellikle yüksek hava sıcaklığına sahip bölgelerdeki karayolu üstyapılarında oluşan tekerlek izlerine karşı direnç sağlamak üzere kullanılmaktadır. SBS modifiye bitümlerde de, kaolin modifiye bitümlere benzer olarak, viskozite, yumuşama noktası ve PI değerleri artarken düktilitede azalma meydana gelmektedir [1, 28].

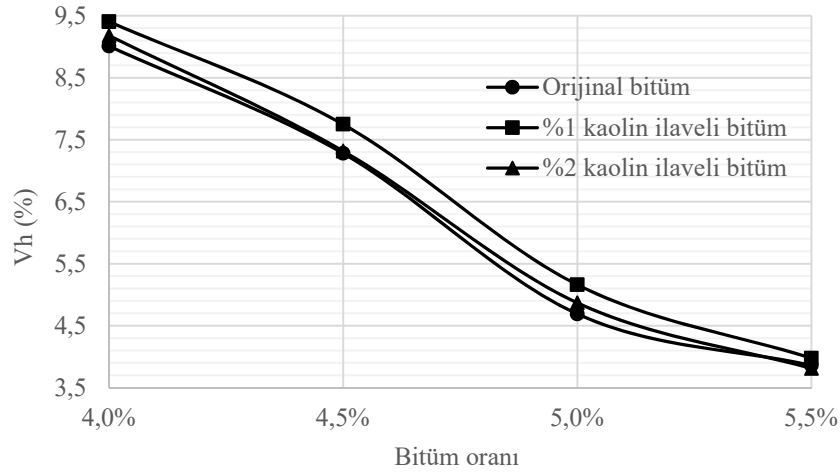
Nicholson soyulma testi ile orijinal ve kaolin ilaveli bitüm ile bitümlü karışımların soyulma direncinde meydana gelen değişim araştırılmıştır. Soyulma, bitümlü karışımlarda agrega-bitüm ara yüzeyindeki bağ kuvvetinin (adezyonun) su tesiriyle kopması olarak tanımlanabilir. Test sonunda numunelere ait görüntülerin sunulduğu Şekil 5 incelendiğinde kaolin ilaveli bitüm ile adezyonun olumsuz etkilendiği görülebilir. Görsel olarak yapılan değerlendirmelere göre orijinal bitüm ile elde edilen %95'lik soyulma direnci %1 ve %2 kaolin ilaveli bitüm ile sırasıyla %80 ve %70'e gerilediği kanaatine varılmıştır.



Şekil 5. Nicholson soyulma test numunelerinin deney sonrası görüntüleri
(Images of Nicholson stripping test samples after testing)



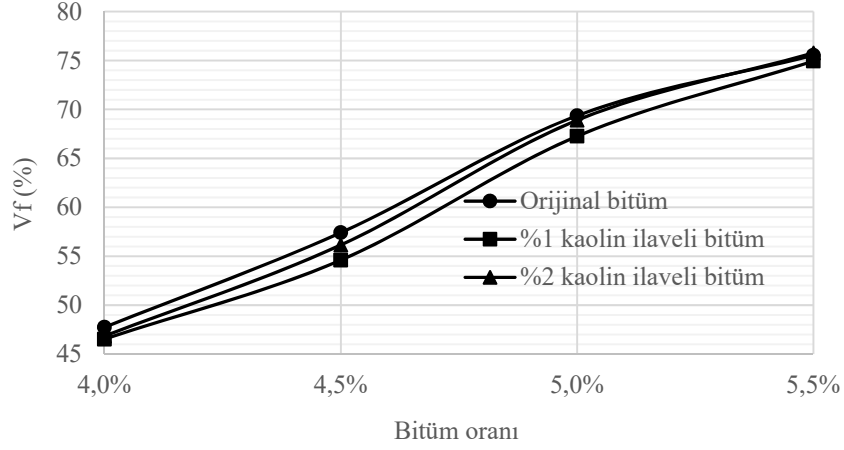
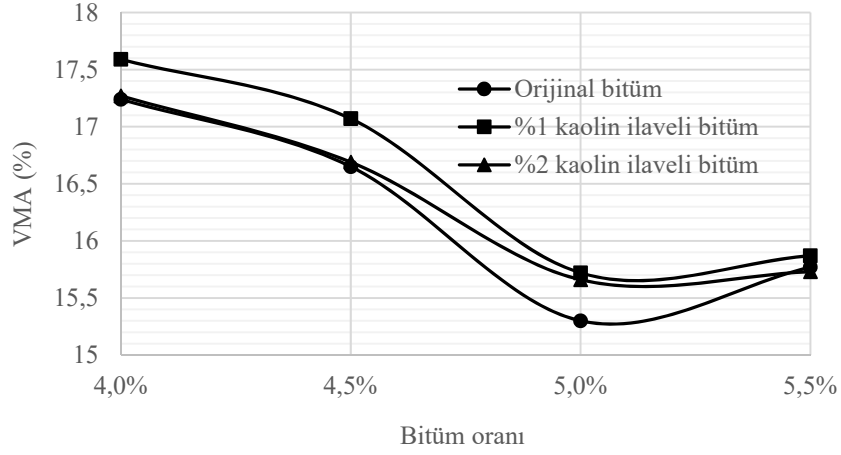
Şekil 6. D_p üzerinde kaolin etkisi (Kaolin effect on D_p)



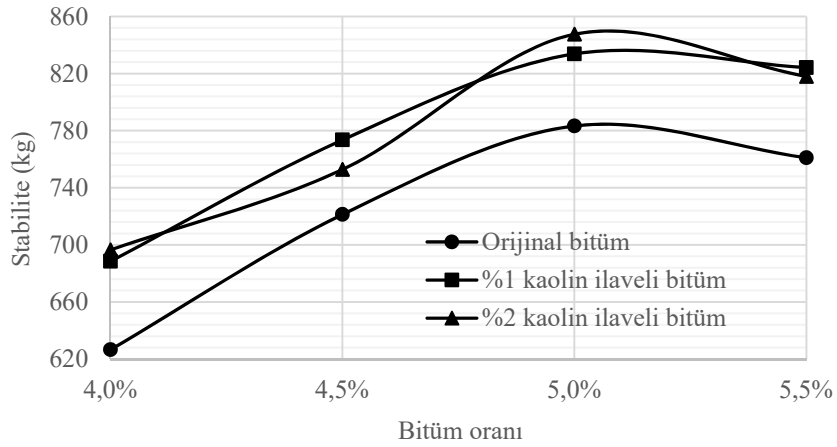
Şekil 7. V_h üzerinde kaolin etkisi (Kaolin effect on V_h)

Kaolinin bitümlü karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Marshall tasarımları ile incelenmiştir. Tasarımlarda orijinal bitüm, %1 kaolin ilaveli bitüm ve %2 kaolin ilaveli bitüm ayrı ayrı kullanılmıştır. Kaolin ile bitümlü karışımların pratik özgül ağırlık (D_p), hava boşluğu

oranı (V_h), bitümle dolu boşluk oranı (V_f), agrega daneleri arasındaki boşluk oranı (VMA) ve stabilite özelliklerinde meydana gelen değişimler Şekil 6 ile Şekil 10 arasında sunulmuştur. Şekil 6-10 arasında verilen sonuçlar tasarımlarda kullanılan bitüm türlerinden bağımsız olarak

Şekil 8. V_f üzerinde kaolin etkisi (Kaolin effect on V_f)

Şekil 9. VMA üzerinde kaolin etkisi (Kaolin effect on VMA)



Şekil 10. Marshall Stabilitesi üzerinde kaolin etkisi (Kaolin effect on Marshall Stability)

incelendiğinde; bitüm oranının artmasıyla karışımlardaki boşluk oranlarında (V_h) sürekli azalma, bitümlü dolu boşluk oranlarında (V_f) sürekli artma olduğu görülmektedir.

Stabilitede %5'lik bitüm oranına kadar artışın sonrasında azalma, agrega daneleri arası boşluk oranında (VMA) ise tam tersi durum gözlenmiştir. Gerek orijinal bitüm gerekse

kaolin ilaveli bitümler ile elde edilen sonuçlar ve parametrelerin değişim trendleri Marshall tasarımlarında beklenen genel sonuçlarla uyumluluk içerisinde. Karışım özellikleri üzerinde kaolinin meydana getirdiği değişimler incelendiğinde ise; kaolin modifiyeli bitüm ile bitümlü karışımlarda boşluk oranının (V_h) ve agrega daneleri arası boşluk oranının (VMA) arttığı, bitüm ile dolu boşluk oranının (V_f) azaldığı görülmektedir (Şekil 7-9). Bu durum kaolin modifikasyonu ile bitüm viskozitesinin artmasına bağlı olarak aynı sıcaklıkta imal edilen bitümlü karışımlarda kaolinin işlenebilirlik özelliğini azaltmasından ileri gelir. Kaolin ile bitümlü karışımlardaki boşluk oranının artmasıyla da briketlerin özgül ağırlıklarında azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 6). Kaolin ile görülen ve %11,2'ye kadar ulaşan stabilite artışı ise (Şekil 10) bitüm kohezyonundaki artışla ilişkilendirilebilir. Benzer durum SBS katkılı bitüm kullanılan karışımlarda da elde edilmektedir. SBS katkılı bitümler viskozitede artış yaratırken karışımın işlenebilirliğini azalttığından bsk üretim sıcaklığı artırılabilir [4]. Kaolinin agrega olarak kullanıldığı çalışmada, bitümlü karışımın mekanik özelliklerinde (yoğunluk, boşluk oranı, VMA, V_f ve stabilite) yukarıda özetlenen bulgularla aynı yönde olan değişimler elde edilmiştir [25].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 50/70 penetrasyon dereceli bitüm, granit kayalardan elde edilen bir kil türü olan ve ülkemizde arı kil olarak bilinen kaolin ilave edilerek modifiye edilmiştir. Kaolin ilavesiyle bitüm ve bitümlü karışım özelliklerinde meydana gelen değişimler viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, Nicholson soyulma ve Marshall testleriyle değerlendirilmiş ve aşağıdaki bulgulara erişilmiştir;

- Bitümün kaolin ile modifiye edilmesi işlemi 120°C'de 20 dakikada gerçekleştirilmiştir.
- Kaolin ile bitümün viskozite, yumuşama noktası ve PI değerleri artmış; penetrasyon değeri azalmıştır. Buna göre kaolin ilavesiyle bitüm daha katı bir hal almış ve sıcaklığa olan duyarlılığı azalmıştır.
- Kaolin ile bitümün düktil özelliği azalmıştır.
- Bitümlü karışımların soyulma direnci kaolin ilaveli bitüm ile %95'ten %70'e azalmıştır.
- Kaolin ile bitümlü karışımlarda bitümle dolu boşluk oranı (V_f) ve pratik özgül ağırlık (D_p) değerlerinde azalma, boşluk oranı (V_h) ve agrega daneleri arası boşluk oranı (VMA) değerlerinde artma meydana gelmiştir.
- Bitümlü karışım özelliklerinin başında gelen Marshall Stabilite değeri kaolin ilaveli bitüm ile artış göstermiştir. Bu artış %2 kaolin ilaveli bitüm kullanılması durumunda %11,2'ye kadar erişmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Airey G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, 82, 1709-1719, 2003.

2. Tayfur S., Özen H., Aksoy A., Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Constr Build Mater*, 21 (2), 328-337, 2007.
3. Al-Hadidy A.I., Tan Y., Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements, *Constr Build Mater*, 23, 2941-2950, 2009.
4. Kök B.V., Çolak H., Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt, *Constr Build Mater*, 25, 3204-3212, 2011.
5. Al-Kateeb G.G., Ramadan K.Z., Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using superpave DSR, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 127-135, 2015.
6. Cao W., Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process, *Constr Build Mater*, 21 (5), 1011-1015, 2007.
7. Zhang F., Yu J., The research for high-performance SBR compound modified asphalt, *Constr Build Mater*, 24 (3), 410-418, 2010.
8. Siddig E.A.A., Feng C.P., Ming L.Y., Effects of ethylene vinyl acetate and nanoclay additions on high-temperature performance of asphalt binders, *Constr Build Mater*, 169, 276-282, 2018.
9. Haddadi S., Ghorbel E., Laradi N., "Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA, *Constr Build Mater*, 22 (6), 1212-1219, 2008.
10. Şengöz B., Işıkyakar G., Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Constr Build Mater*, 22 (9), 1897-1905, 2008.
11. Jun L., Yuxia Z., Yuzhen Z., The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen, *Constr Build Mater*, 22 (6), 1067-1073, 2008.
12. Attaelmanan M., Feng C.P., Al-Hadidy A.I., Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Constr Build Mater*, 25, 2764-2770, 2011.
13. Çubuk M., Gürü M., Çubuk M.K., The effect of polytetrafluoroethylene on the rheological properties of bitumen, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (3), 623-630, 2011.
14. Arslan D., Gürü M., Çubuk M.K., Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens, *Fuel*, 102, 766-772, 2012.
15. 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.
16. 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.
17. Lebedev M.S., Kozhukhova N.I., Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity, 3rd International Conference on Rheology and Modeling of Materials IOP Conf. Series, Hungary, 012026, October 2-6, 2017.
18. El-Shafie M., Ibrahim I.M., Abd El Rahman A.M.M., The addition effects of macro and nano clay on the

- performance of asphalt binder, *Egyptian Journal of Petroleum*, 21, 149-154, 2012.
19. Shahabadi A.Z., Shokuhfar A., Nejad S.E., Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles, *Constr Build Mater*, 24 (7), 1239-1244, 2010.
 20. Jin J., Tan Y., Liu R., Lin F., Wu Y., Qian G., Wei H., Zheng J., Structure characteristics of organic bentonite and the effects on rheological and aging properties of asphalt, *Powder Technology*, 329, 107-114, 2018.
 21. Omar H.A., Yusoff N.I.Md., Ceylan H., Rahman I.A., Sajuri Z., Jakarni F.M., Ismail A., Determining the water damage resistance of nano-clay modified bitumens using the indirect tensile strength and surface free energy methods, *Constr Build Mater*, 167, 391-402, 2018.
 22. Zhang H., Yu J., Wu S., Effect of montmorillonite organic modification on ultraviolet aging properties of SBS modified bitumen, *Constr Build Mater*, 27, 553-559, 2012.
 23. 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 nanocomposites on bitumen rheological properties, *Constr Build Mater*, 125, 873-883, 2016.
 24. Liu G., Wu S., van de Ven M., Yu J., Molenaar A., Influence of sodium and organo-montmorillonites on the properties of bitumen, *Applied Clay Science*, 49, 69-73, 2010.
 25. Maria del Pilar Durante I., Francisco dos Santos J.O., Gouveia C.C., Recycling of Kaolin processing Waste as Aggregate in Asphalt Concrete, *Advanced Materials Research*, 717, 21-26, 2013.
 26. Li P., Jiang X., Ding Z., Zhao J., Shen M., Analysis of viscosity and composition properties for crumb rubber modified asphalt, *Constr Build Mater*, 169, 638-647, 2018.
 27. Read J. ve Whiteoak D., *The Shell Bitumen Handbook*, fifth ed., Thomas Telford Publishing, London, 192-193, 2003.
 28. Bulatovic V.O., Rek V., Markovic K.J., Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen, *Journal of Elastomers & Plastics*, 46, Sayı 5, 448-469, 2014.

