


Klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü karışımların Marshall karışım tasarımının değerlendirilmesi

Evaluation of Marshall mix design of bituminous mixtures prepared with clinoptilolite

İsmail Çağrı GÖRKEM^{1*} 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.
cagrigorkem@mu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.12.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 17.04.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.23855

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde, otoyol ağlarına duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte asfalt üretimi de artmaktadır. Ancak, asfalt üretiminin doğaya zararlı etkilerinden dolayı araştırmacılar çevreye duyarlı, üretim maliyetlerini azaltan ve özellikleri bakımından en az geleneksel ASFALT ile aynı performansa sahip yeni asfalt türleri keşfetmeye çalışmaktadırlar. Ilık karışım asfalt (IKA) kullanımının asıl amacı emisyonları azaltmak ve farklı mekanizmalarla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürerek işlenebilirliği arttırmaktır. IKA'daki son gelişmeler organik ticari mumlar olarak Sasobit®, Asphaltan B® ile sentetik zeolitler olarak Advera® WMA ve Aspha-min® gibi bitüme pozitif etkileri olan katkıların kullanımına olan ilgiyi teşvik etmektedir. Türkiye'de 50 milyar tonun üzerinde yüksek kaliteli doğal zeolit rezervi bulunmaktadır. Bu da, doğal zeolitin ılık karışım asfalt üretiminde kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, klinoptilolit tipi doğal zeolitin ılık karışım asfalt katkısı olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bitüm örnekleri 50/70 penetrasyon sınıfı saf bitüm ile beş farklı içerikteki klinoptilolit karıştırılarak hazırlanmıştır. Her bir örnek için üretim sıcaklık ve süreleri belirlendikten sonra, geleneksel bitüm deneyleri ile özellikleri değerlendirilmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında meydana gelen düşüş ile birlikte, klinoptilolit örneklerinin mekanik davranış özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ilık karışım asfalt, Doğal zeolit, Klinoptilolit, Köpüklendirme

Abstract

Today, the production of asphalt has increased with the increase in demand for highway network. However, due to harmful effects of asphalt production on the nature, researchers have tried to explore new kinds of asphalt that are environmentally-conscious, cost lower production and that exhibit at least the same performance of conventional ASPHALT in terms of properties. The main objective of using warm mix asphalt (WMA) is to reduce emissions and improve the workability by lowering the mixing and compaction temperatures of ASPHALT through different mechanisms. Recent advances in WMA have spurred interests in the use of organic commercial waxes such as Sasobit®, Asphaltan B® as well as synthetic zeolite such as Advera® WMA and Aspha-min® as additives in bitumen to achieve certain positive effects. There are over 50 billion tons of high quality natural zeolite reserves in Turkey. This means that natural zeolite can be utilized in the production of warm mix asphalt. This study targets the evaluation of clinoptilolite type natural zeolite as a warm mix additive. The bitumen samples have been produced by mixing 50/70 penetration grade base bitumen with clinoptilolite at five different contents. After determining the production temperature and time related to each sample, the properties have been evaluated by conventional bitumen tests. The impact of the reduction of mixing and compaction temperatures on the mechanical behavior of asphalt concrete samples involving clinoptilolite has also been determined and compared with the control samples.

Keywords: Warm mix asphalt, Natural zeolite, Clinoptilolite, Foaming

1 Giriş

Küresel ekonomideki hızlı gelişmelere bağlı olarak yeni karayolu ağlarına duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Geleneksel bitümlü karışımların üretimleri temel alındığında, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının önemli ölçüde yüksek olduğu bilinmektedir. Bu tür yüksek sıcaklık gereksinimleri, üretim esnasında daha fazla yakıt harcanmasına ve ortaya çıkan yüksek miktarlardaki emisyon gazlarının doğaya tamiri zor ya da imkansız zararlar vermesine neden olmaktadır [1]. Son yıllarda, artan çevre duyarlılığının ve enerjinin daha verimli kullanımı düşüncesi ile birlikte araştırmacılar, bitümlü karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürmek amacıyla çalışmalar yapmaktadırlar. Bu araştırmaların asıl amacı, üretim sırasındaki yakıt kullanımını azaltarak ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını düşürmek ve en az geleneksel bitümlü karışımlar kadar iyi dayanım ve durabilite elde edebilmektir [2]. Bu düşünce ile bir dizi yeni yöntem ve ürün geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden biri de ılık karışım

asfaltlar (IKA)'dır. IKA geleneksel asfaltlara göre daha düşük karıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyan bir tür bitümlü karışımdır. Genel olarak, geleneksel bitümlü sıcak karışımlarda karıştırma sıcaklıkları 150 ile 180 °C aralığındayken, ılık karışım asfaltlar için bu değer 100 ile 140 °C olmaktadır [3],[4].

İKA'ların avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Daha düşük emisyon ve duman,
- 2) Enerji tüketimi ve maliyetlerin azalması,
- 3) İşlenebilirlik ve sıkıştırma verimliliğinin artırılması,
- 4) Soğuma süresinin az olması nedeniyle yolun hemen trafice açılması.

Yapılan ilk arazi çalışmaları 1956 yılında bitümün köpüklendirilmesi yöntemiyle başlamıştır [5]. Bu çalışma bitümü köpüklendirmek amacıyla, bitüme doğrudan buhar enjeksiyonunun ilk başarılı örneğidir. Csanyi tarafından 1956 yılında geliştirilen bu yöntemde göre bitüm, atomize şeklinde bir karıştırıcı içine enjekte edildikten sonra karıştırıcıya buhar

enjekte edilerek viskozitesi düşürülmekte ve agregalar bu atomize bitüm bulutunun içinden geçirilmektedir. Bu durum, bitümün mineral agrega ile temasından önce köpüklendirilmesini sağlayan sistemlerin geliştirilmesinin önünü açmıştır. Bu sayede, köpüklendirilmiş bitümlü malzemenin yarı kararlı olduğu süre içerisinde farklı zeminler ile karıştırılarak malzemenin özelliklerini geliştirebileceği ve yol yapım malzemesi olarak kullanılabilmesi keşfedilmiştir.

Ilık karışım asfaltlarla ilgili modern çalışmalar 1997 yılında Alman Bitüm Forumu ile başlamıştır [6]. Bu ilk forumun amacı, bitüm üreticilerinin dikkatlerini o zamana kadar yapılan sınırlı çalışmalar ile bu yeni konuya çekmek olarak belirlenmiştir. Forum sonrasında asfalt üreticilerinin önerileri ile birlikte araştırmacılar, organik (Sasobit®, Asphaltan B®) ve kimyasal (Evotherm®, Rediset® WMX, Revix®) katkıları ile su ile köpüklendirme (Advera® WMA, Aspha-Min®) yöntemlerini içeren detaylı araştırmalara başlamışlardır.

Organik ılık karışım asfalt katkıları çevre dostu gibi görünmesine rağmen, bu tür katkıların üretimleri kimi endüstriyel işlemleri gerektirmektedir. Ancak, doğal zeolitlerin çıkarma ve işleme süreçlerinin hiçbirinde endüstriyel bir işleme gerek duyulmamaktadır. Doğal zeolit ile ilgili yapılan sınırlı çalışmalarda doğal zeolit İKA katkısı olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir [5]. Doğal zeolitler yapıları itibarıyla mikro gözenekli, alüminosilikat mineraller olmakla birlikte, genellikle ticari emici (kir tutucu) maddeler olarak kullanılmaktadırlar [7],[8].

Klinoptilolit doğada en fazla bulunan, silika ve alüminyum tetrahedranın mikro gözenekli diziliminden oluşan ve $(Na_{0.5}K_{2.5})(Ca_{1.0}Mg_{0.5})(Al_6Si_{30})O_{72}.24H_2O$ kimyasal formülasyonuna sahip bir doğal zeolit türüdür. Mohs sertliği 3.5 ile 4 ve özgül ağırlığı 2.1 ile 2.2 arasında değişen, beyazdan kıvrımsı renge kadar, yassı monoklinik tektosilikat kristal formundadır. Gözenekli yapısı ve yüksek iyon değiştirme kapasitesi sayesinde birçok çeşit gazı ve kokuyu; suyu ve nemi; petrokimyasal maddeleri, düşük düzeyde radyoaktif elementleri, amonyumu, toksinleri, ağır metalleri ve pek çok solüsyonu tutma ve soğurma özelliğine sahiptir. Tarım, hayvancılık, arıtma, inşaat (çimento katkısı olarak) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Klinoptilolit yataklarının çoğunluğu Ege Denizi havzası etrafında bulunmaktadır [9]. Buna ek

olarak ülkemiz, doğal zeolitlerin oluşması bakımından gerekli jeolojik çevreye sahiptir. Türkiye genelinde yaklaşık 50 milyar ton civarında doğal zeolit bulunduğu ve bunların önemli bir miktarının batı bölgelerimizde yer aldığı tahmin edilmektedir [10],[11].

Bu çalışmada, klinoptilolit çeşidi doğal zeolit ile ılık karışım asfalt katkısı olarak kullanımı değerlendirilmiştir. Seçilen optimum miktardaki katkı oranı ve karıştırma sıcaklıklarındaki düşüş için izin verilen aralık dahilinde, bitüm örneklerinin penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, bitümlü karışımların ise Marshall stabilite ve akma değerleri gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2 Deneysel çalışmalar

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin özellikleri, üretim süre ve sıcaklıklarının belirlenmesi, bitümlü malzeme örneklerinin hazırlanması ve deney yöntemleri ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir.

2.1 Kullanılan malzemeler ve özellikleri

Çalışma kapsamında bitümlü bağlayıcı olarak Türkiye Petrol Rafinerileri AŞ. (TÜPRAŞ) İzmir Rafinerisi'nden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bitüm üzerinde bağlayıcının özelliklerini tespit etmek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite vb. gibi deneyler uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 1'de verilmektedir.

Bu çalışmada, hazırlanan bitümlü karışımlarda kaba agregası bazalt, incesi ve mineral filleri kalker olmak üzere iki farklı tip agrega karışımı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan agrega malzemelerinden kalker ve bazalt agregaları Dere Madencilik AŞ'ne ait Belkahve/İzmir Taş Ocağı'ndan temin edilmiştir. Agregası özelliklerini belirlemek amacıyla agrega grupları üzerinde özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, sağlamlık yüzdesi vb. deneyler uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 2'de verilmektedir.

Agregası özelliklerinin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğine ilişkin deneyler uygulandıktan sonra Karayolları Teknik Şartnamesi'nde aşınma tabakaları için belirtilen Aşınma Tip-1 gradasyon limitlerine göre elek analizi deneyi uygulanmış, sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1: Saf bitümün özellikleri.

Deneyler	Standart	Sonuçlar	Şartname Limitleri
Penetrasyon (25 °C; 0.1 mm)	ASTM D5 EN 1426	55	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36 EN 1427	49	46-54
Viskozite (135 °C)-mPa.s	ASTM D4402	412.5	-
Viskozite (160 °C)-mPa.s	ASTM D4403	137.5	-
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (TFOT); (163 °C, 5 sa.)	ASTM D1754 EN 12607-1		
Kütle Değişimi (%)		0.04	0.5 (maks)
Penetrasyon Farkı (%)	ASTM D5 EN 1426	25	50 (min)
TFOT sonrası Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36 EN 1427	54	48 (min)
Düktilite (25 °C), cm	ASTM D113	100	-
Özgül Ağırlık	ASTM D70	1.03	-
Parlama Noktası (°C)	ASTM D92 EN 22592	260	230 (min)

Tablo 2: Kullanılan kalker ve bazalt karışımının özellikleri.

Deneyle	Şartname	Sonuçlar		Şartname Limitleri
		Kalker	Bazalt	
Kaba Agrega Özgöl Ağırlığı	ASTM C 127			
Hacim		2.686	2.666	-
DYKA		2.701	2.810	-
Zahiri		2.727	2.706	-
İnce Agrega Özgöl Ağırlığı	ASTM C 128			
Hacim		2.687	2.652	-
DYKA		2.703	2.770	-
Zahiri		2.732	2.688	-
Filler Özgöl Ağırlığı		2.725	2.731	-
Los Angeles Aşınma (%)	ASTM C 131	24.4	14.2	maks 45
Yassılık İndeksi (%)	ASTM D 4791	7.5	5.5	maks 10
Sağlamlık Yüzdesi (%)	ASTM C 88	1.47	2.6	maks 10-20
İnce Agrega Köşelliliği	ASTM C 1252	47.85	58.1	min 40

Tablo 3: Elek çaplarına göre gradasyon değerleri.

	19-12.5 mm (Bazalt)	12.5-5 mm (Bazalt)	5-0 mm (Kalker)	Karışım Gradas. (%)	Şartname	Şartname Limitleri
Karış Oranı (%)	15	45	40			
Elek No.	ASTM C 136					
¾"	100	100	100	100		100
½"	35.7	100	100	90.5		83-100
3/8"	2.5	89	100	80.5		70-90
No 4	0.4	16	100	47.3		40-55
No 10	0.3	1.2	81	33		25-38
No 40	0.2	0.7	33	13.5		10-20
No 80	0.15	0.4	22	9		6-15
No 200	0.10	0.2	13	5.3		4-10

Kullanılan klinoptilolit ise Enli Madencilik'e ait Manisa-Gördes'teki zeolit ocağından toz halinde temin edilmiştir. Klinoptilolite ait özellikler Tablo 4'te belirtilmiştir.

2.2 Klinoptilolit için üretim süre ve sıcaklıklarının belirlenmesi

Klinoptilolit için karıştırma süre ve sıcaklıklarını belirlemek amacıyla farklı sıcaklık (100-120 °C) ve karıştırma sürelerinde (5-60 dk.) bitümlü malzemelere ASTM D 4402 ve AASHTO TP 48 deney standartlarında belirtilen Brookfield viskozite

deneyi uygulanmıştır. Bu işlem sırasında, öncelikli olarak üretim sıcaklıkları sabit tutulmuş ve karıştırma süreleri arttırılmıştır. Üretim sıcaklıklarının belirlenmesinin ardından, karıştırma süresi 5'er dk. arttırılarak bitümlü malzemenin viskozite değerleri ölçülmüştür. Viskozite değerlerinin sabit kaldığı değerler üretim süre ve sıcaklığı olarak seçilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre, üretim süre ve sıcaklığı, sırasıyla, 20 dk. ve 120 °C olarak bulunmuştur.

Tablo 4: Klinoptilolit fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Yapı		Fiziksel Özellik	
	(%)	Boşluk (%)	34
SiO ₂	71.29	Ana Kanal Boyutları (A)	3.9x5.4
Al ₂ O ₃	13.55	Termal Stabilité	Yüksek
Fe ₂ O ₃	1.15		
K ₂ O	3.5		
H ₂ O	5.9		
CaO	1.96		
MgO	0.7	İyon Değiştirme Kapasitesi (meq/g)	2.16
Na ₂ O	0.6		
Ti	0.02		
Ag	0.04		
N			
B (ppm)	30		

2.3 Klinoptilolit içeren bitüm örneklerinin hazırlanması

IKA katkısı olarak kullanılan klinoptilolit ile hazırlanan bitüm örnekleri, henüz üretim tamamlanmadan içeriğindeki suyun buharlaşmasını önlemek ve yapısal olarak kısa sürede homojen bir şekilde bitüm içerisinde dağılmalarını sağlamak amacıyla laboratuvar tipi karıştırıcıda 1100 rpm ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu işlem sırasında beher içerisindeki saf bitüm 120 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış olup sıcaklığın sabitlendiği andan başlayarak bitüme yavaşça klinoptilolit ilave edilmiştir.

Saf bitüme ilave edilen klinoptilolit tipi doğal zeolit oranı, bitümün ağırlığına %3-7 olacak şekilde seçilmiştir. Bu oranların seçilmesinin asıl amacı, sentetik zeolitlerin bitümlü karışımlarda kullanımının üretici firmalar tarafından bu oranlarda tavsiye edilmesidir. Belirlenen üretim süre ve sıcaklığında yapılan karıştırma işleminden sonra elde edilen numuneler, vakit kaybedilmeden deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur. Anlık köpüklenme yarattığından bitüme klinoptilolit ilavesi, katkı içerisindeki su buharlaşana kadar bitümün viskozitesinde önemli ölçüde düşüş sağlamaktadır. Bu sebeple, klinoptilolit içeren bitümlü malzemeler üretimin hemen ardından direkt olarak kullanılmalıdır.

2.4 Deney yöntemleri

2.4.1 Geleneksel bitüm deneyleri

Saf bitüm ve klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü malzemeler penetrasyon (ASTM D5-97), yumuşama noktası tayini (ASTM D36-95 (2000)), ince film halinde ısıtma (ASTM D1754), ince film halinde ısıtma sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası tayini ve depolama stabilitesi (EN 13399) deneylerin tabi tutulmuştur. Buna ek olarak, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilenler ile penetrasyon indeksi (PI) hesaplanarak bitüm örneklerinin sıcaklığa karşı duyarlılıkları belirlenmiştir.

2.4.2 Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi

Bitümlü malzemelerin çoğu, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralığında, hali hazırda, Newtonian olmayan (non-Newtonian) sıvılardır. Uygun karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının

seçiminde bitümün işlenebilirliği üzerindeki viskozite etkisi çok önemlidir. AASHTO T 316-13'e göre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları için arzu edilen viskozite değerleri sırasıyla 170±20 mPa.s ve 280±30 mPa.s'dir [12].

Yapılan ayrıntılı literatür taramasında, sentetik zeolitlerin çoğu bitümün ağırlığına %5 oranında bitümlü malzemeye ilave edildiği belirlenmiştir [3],[6]. Klinoptilolit sentetik zeolite alternatif bir IKA katkısı olabileceği düşüncesinden hareketle, klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü malzemeler için de aynı oran seçilmiştir.

ASTM D4402'ye göre bitümlü malzemelerin viskoziteleri, Brookfield viskozimetre ile ölçülmüştür. Yaklaşık 30 gr. Bitüm etüvde yeterince sıvılaşıncaya kadar ısıtılarak numune kabına konmuştur. İçerisinde bitümlü malzemenin bulunduğu numune kabı ısıtıcı haznesine yerleştirilmiş ve 15 dk. süresince termal dengeye gelmesi sağlanmıştır. Bu süre sonunda mil viskozite ölçümü yapmak amacıyla numune kabına daldırılarak deney başlatılmıştır. 30 dk. süre ile uygulanan deney sonucunda elde edilen viskozite-sıcaklık grafiği ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir [13].

2.4.3 Mekanik özellikler

Belirli bir gradasyondaki agregalar için Marshall karışım tasarımı yöntemi (ASTM D 1559) ile optimum bitüm içeriklerinin belirlenmesi amacıyla, farklı bitüm içerikleriyle (%3.5-5.5) Marshall numuneleri hazırlanmış ve elde edilen grafikler doğrultusunda optimum bitüm içerikleri tayin edilmiştir. Bu amaçla, her bir bitüm içeriği için üçer numune hazırlanarak toplamda 15 numune için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, %4 hava boşluğuna denk gelen değer optimum bitüm içeriği olarak seçilmiştir.

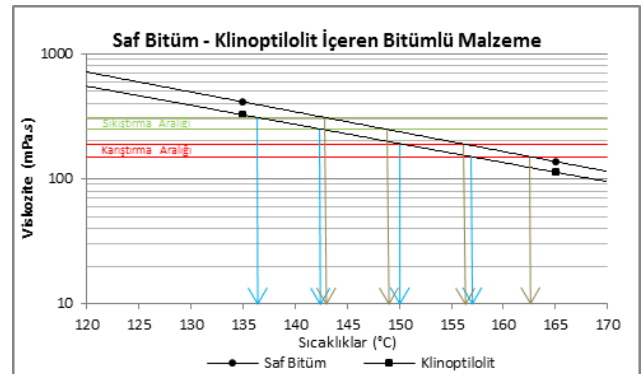
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Geleneksel deney yöntemleri

Klinoptilolit katkısının bitümün performansına etkisinin değerlendirilmesi amacıyla, numuneler üzerinde geleneksel bitüm deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

3.2 Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları deney sonuçları

Bitümlü malzemelerin viskozitelerinin belirlenmesi amacıyla numuneler üzerine farklı sıcaklıklarda Brookfield viskozite deneyi uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1: Saf bitüm ve klinoptilolite ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları grafiği.

Tablo 5: Klinoptilolite ile hazırlanan bitümlü malzemelerin geleneksel bitüm deneyleri.

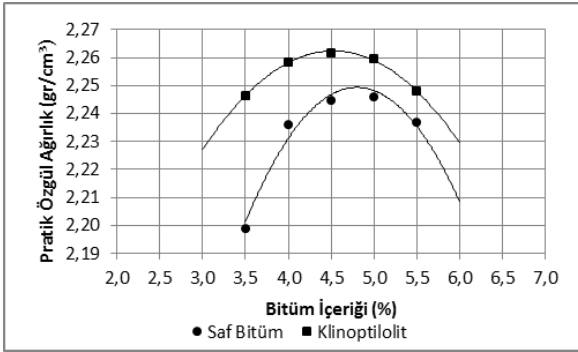
Test	%0	%3	%4	%5	%6	%7
Penetrasyon (25 °C; 0.1mm)	55	54	53	51	45	42
Yumuşama Noktası (°C)	49	54	54	55	58	59
Viskozite (135 °C; mPa.s)	412.5	362.5	350	325	400	487.5
Viskozite 160 °C; mPa.s)	137.5	162.5	125.5	113	187.5	187.5
Parlama Noktası (°C)	260+	260+	260+	260+	260+	260+
Düklilite (25 °C; cm)	100+	100+	100+	100+	100+	100+
TFOT (163 °C; 5sa.)						
Kütle Değişimi (%)	0.04	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17
Pen. Farkı (%)	25	18	17	15	10	10
Yumuşama Noktasındaki Değişim (°C)	5.0	4.1	4.0	3.7	3.5	3.2
Depolama Stabilitesi (°C)		1.6	1.8	2.0	2.4	2.4
Pen. İndeksi	-1.20	-0.16	-0.10	0.02	0.40	0.44

Bitümlü malzemelerden beklenen uygun karıştırma (170 ± 20 mPa.s) ve sıkıştırma (280 ± 30 mPa.s) viskozitelerine göre, %5 oranında klinoptilolit içeriği ile hazırlanan bitümlü malzemeler için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla 154 °C ve 140 °C olarak bulunmuştur. Elde edilenler ışığında, saf bitüme %5 oranında klinoptilolit ilavesinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında 9 °C'lik bir düşüğe sebep olduğu belirlenmiştir.

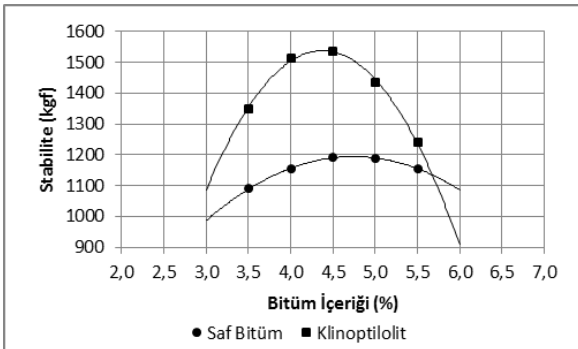
3.3 Mekanik özelliklere ait deney sonuçları

Malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinin ardından, optimum bitüm içeriğinin tayini amacıyla, farklı bitüm içerikleriyle (%3.5-5.5) hazırlanan karışım örneklerine Marshall Stabilitesi ve Akma Deneyi uygulanmıştır.

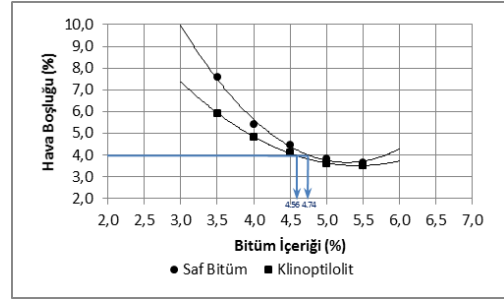
Marshall karışım tasarımına ait pratik özgül ağırlık değerleri Şekil 2, stabilite değerleri Şekil 3, hava boşluğu değerleri Şekil 4, VFA değerleri Şekil 5, akma değerleri Şekil 6 ve VMA değerleri ise Şekil 7'de verilmektedir. Burada, %4 hava boşluğuna denk gelen optimum bitüm içeriği %4.56 olarak bulunmuştur.



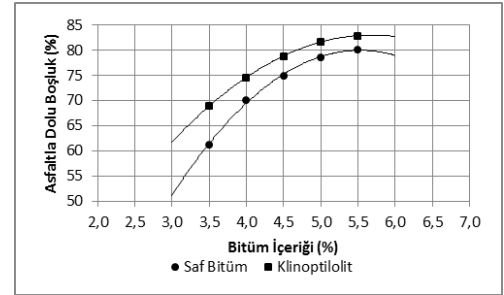
Şekil 2: Pratik özgül ağırlık değerleri.



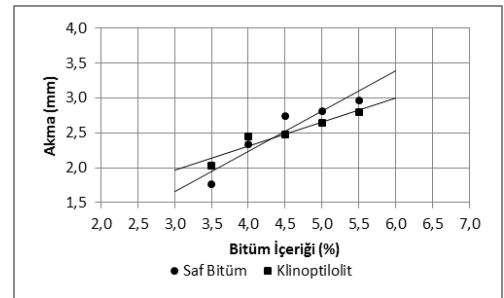
Şekil 3: Stabilite değerleri.



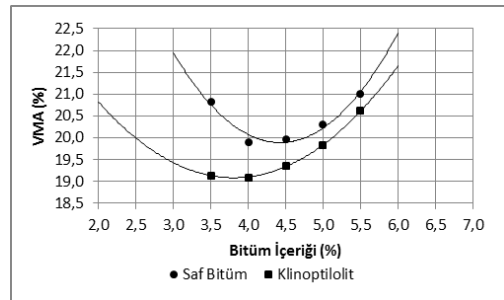
Şekil 4: Hava boşluğu değerleri.



Şekil 5: VFA değerleri.



Şekil 6: Akma değerleri.



Şekil 7: VMA değerleri.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerine ait stabilite değerleri saf bitüm ile hazırlananlara göre yüksektir. Buradan, bitümlü karışımlara klinoptilolit ilavesinin karışımın stabilitesini arttırdığı söylenebilir. Stabilite, esnek kaplamalardaki tekerlek izi oluşumu ve deplasmana karşı dirençlerde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Yine Şekil 4'teki %4 hava boşluğuna denk gelen değerler dikkate alındığında, klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü karışımlara ait bitüm içeriğinin, saf bitümlü örnekler göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuca göre klinoptilolit, düşük bitüm miktarıyla agregaların bitüm ile tam olarak kaplanmasını sağlamaktadır. Akma, herhangi bir çatlak oluşmadan asfalt betonunun alt tabakasındaki oturma ve hareket kabiliyeti olarak tariflenebilir. Akma, esnek üstyapının davranışı ile bitümün elastik ve plastik deformasyon özelliklerini belirler. Akma ile iç sürtünme arasında ters yönlü bir doğrusal ilişki vardır [14]. %4.5 bitüm içeriğine kadar klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü karışımların akma oranı saf bitüm ile hazırlanan örnekler göre daha yüksektir (Şekil 6). Buna göre, bitümlü karışımlara klinoptilolit ilavesi bahsi geçen bitüm içeriğine kadar çatlak oluşma olasılığını düşürmektedir. %4.5 bitüm içeriğinden daha fazla oranlarda hazırlanan örnekler için ise klinoptilolit filler davranışı göstermektedir. Şekil 7'den de anlaşılacağı üzere, saf bitüm ile hazırlanan karışım örneklerine ait mineral agregalar arası boşluk (VMA) değerleri klinoptilolit ile hazırlanan örnekler göre daha yüksektir. Bitümlü karışımlarda yüksek oranda filler kullanımı, karışımın VMA oranının düşmesine neden olmaktadır [15]. Bitümlü malzemeye klinoptilolit ilavesi karışımdaki filler oranını arttırmakta ve böylelikle karışımın VMA oranını düşürmektedir.

4 Sonuç

Bu çalışmada, klinoptilolit'in IKA katkısı olarak kullanımının etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, klinoptilolit ile hazırlanan bitüm örnekleri üzerine geleneksel bitüm deneyleri (penetrasyon, yumuşama noktası, TFOT vb.) ile Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Elde edilen bulgular ışığında sonuçlar, aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Geleneksel bitüm deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, bitüme eklenen klinoptilolit içeriğinin artmasıyla penetrasyon değerleri düşmüş, yumuşama noktası değerleri ise artmıştır. Sonuçlar ışığında, bitümlü malzemelere klinoptilolit ilavesinin bitümü daha da sertleştirdiği anlaşılmaktadır,
- Bitümlü malzemelere klinoptilolit ilavesi ile birlikte 135 °C ve 160 °C'lerdeki viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak klinoptilolit'in fiziksel yapısı gösterilebilir. Klinoptilolit, içerisindeki suyun buharlaşmasıyla birlikte filler gibi davranmaktadır. İçeriğindeki suyun buharlaşmasıyla bu davranışı gösteren klinoptilolit'in, uzun dönemde işlenebilirliği düşmektedir,
- Viskozite deneyi sonuçlarına göre, klinoptilolit'in bitümlü malzemelerde optimum kullanım oranı sentetik zeolitlerde olduğu gibi %5'tir,
- Bitümlü malzemelere klinoptilolit ilavesi PI değerlerini arttırmıştır. PI değerleri bitümlü malzemelerin termal hassasiyetlerinin değerlendirilmesinde en önemli verilerden birisidir. PI değerlerinin yüksek olması, bitümlü malzemelerin

daha yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olduğunu göstermektedir,

- %5 oranında klinoptilolit kullanımı, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını 9 °C civarında düşürmüştür. Bu bağlamda, klinoptilolit ilavesi bitümlü malzemenin üretimini esnasında ortaya çıkan sera gazlarını düşürmekte ve yakıt tüketimini azaltmaktadır,
- Bitümlü malzemede IKA katkısı olarak klinoptilolit kullanımı optimum bitüm içeriğini düşürmüştür. Köpüklenme, bitümün hacminde artışa neden olmakta ve bu anlık hacim artışı agregaların daha az miktarda bitümlü malzeme ile tamamen kaplanmasını sağlamaktadır,
- Klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü malzeme örneklerine ait mineral agregalar arası boşluk (VMA) değerleri saf bitüm ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde düşmüştür. Bunun nedeni olarak, klinoptilolit'in içeriğindeki suyun buharlaşmasıyla birlikte mineral filler gibi davranması gösterilebilir. Uzun dönem karışım sırasında, klinoptilolit'in yapısındaki kılcal boşluklar bitümle dolmakta ve mineral filler özelliği sergilemektedir. Buna ek olarak, bitümlü karışım içerisindeki yüzey alanının artmasıyla VMA değerleri düşmüştür,
- Bitümlü malzeme örneklerine klinoptilolit ilavesi ile akma değerleri artmıştır. Bu sonuçlar ışığında, klinoptilolit ile hazırlanan bitümlü karışımların saf bitüm ile hazırlanan örnekler göre esnekliği artmıştır,
- Bitüme klinoptilolit ilavesi ile birlikte, karışımların dayanımı artmıştır. Bu bağlamda, klinoptilolit içeren esnek kaplamalı yol üstyapılarında tekerlek yükü taşıma kapasiteleri artmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilenlere göre, IKA katkısı olarak bitümlü karışımlarda klinoptilolit kullanımı sentetik zeolite alternatif olma yönünde umut vaat etmektedir. Farklı sentetik zeolitler ile farklı özelliklerdeki bitüm örnekleri kullanılarak, detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

5 Kaynaklar

- [1] Kim H, Lee SJ, Amirkhanian SN. "Rheology of warm mix asphalt binders with aged binders". *Construction and Building Materials*, 25(1), 183-189, 2011.
- [2] Newcomb D. "An introduction to warm mix asphalt". National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland, USA, 2006.
- [3] Hurley G, Prowell B. "Evaluation of Aspha-Min® for use in Warm Mix Asphalt". National Center for Asphalt Technology, Auburn, USA, Scientific Report, 05-04, 2005.
- [4] Hurley GC, Brian D, Prowell BD. "Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt". National Center for Asphalt Technology, Auburn, USA, Scientific Report, 05-06, 2005.
- [5] Vaitkus A, Cygas D, Laurinavicius A, Perveneckas Z. "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania". *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), 80-86, 2009.
- [6] Keith MP. Warm Mix Asphalt Technology; a Comparative Study of Evotherm (TM) and Conventional Hot Mix Asphalt. MSc Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada, 2009.

- [7] Altan A, Altan O, Alcicek A, Nalbant M, Akbas Y. "Utilizaiton of natural zeolite in poultry". *Ege Journal of Agricultural Research*, 35, 9-16, 1998.
- [8] Grace Co. "Zeolite Structure". <http://www.grace.com/EngineeredMaterials/MaterialSciences/Zeolites/ZeoliteStructure.aspx> (14.05.2016).
- [9] The Mineral and Locality Database. "Clinoptilolite". <http://www.mindat.org/min-1082.html> (05.08.2016).
- [10] Devlet Planlama Teşkilatı. "Lületaş-Tabakalı Sepiyolit-Atapulgit (Paligorskisit), Grafit, Mika, Barit, Talk, Alunit, Zeolit Diğer Endüstri Mineralleri Çalışma Grubu Raporu". Ankara, Türkiye, 2421, 2001.
- [11] Köksaldı V. Gördes ve Yenikent Zeolitlerinin Temel Tarımsal Özellikleri ve Bitki Yetiştirme Ortamı Olarak Kullanım Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1999.
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials "Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer". Washington,DC, USA, D4402M, 2013.
- [13] Wu S, Cong P, Yu J, Luo X, Mo L. "Experimental investigation of related properties of asphalt binders containing various flame retardants". *Fuel*, 85(9), 1298-1304, 2006.
- [14] Ahmedzade P, Alatas T, Geckil T. "Use of carbon black as filler in asphalt concrete". *Technical Journal of the Chamber of Civil Engineers*, 19(4), 4493-4507, 2008.
- [15] Chadboum BA, Skok EL, Newcomb DE, Crow BL, Spindler S. "The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements". Minnesota DOT, USA, Scientific Report, MN/RC-200-13, 1999.