

Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi

Mustafa KESKİN*, Murat KARACASU

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
İki Eylül Kampüsü, 26555, Tepebaşı/Eskişehir
mustafakeski@anadolu.edu.tr

(Geliş/Received: 11.03.2018 ; Kabul/Accepted: 29.08.2018)

Özet

Son yıllarda küresel ısınmanın da etkileriyle geri dönüşüm kavramı her alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Yol mühendisleri geri dönüştürülebilir atık malzemeler ile asfalt betonu üretiminde bilimsel çalışmalar yapmakta ve çalışmalarını şantiye ortamında da uygulamaktadırlar. Bu çalışmanın amacı da çevre kirliliğine yol açan atık depolarının geri dönüştürülebilir bir halde asfalt betonu üretiminde kullanılmasının yollarını aramaktır. Dünya bor minerali rezervinin yaklaşık %70'lik bir dilimini bünyesinde barındıran Eskişehir ve çevre illerde oluşan atık borun yol inşaatı sektörünün hizmetine sokulması amaçlanmaktadır. Çalışmada 1.18mm'lik elek altında kalan ince ve filler malzemenin yerine, değişik oranlarda (%5, %10 ve %15) Ögütülmüş Atık Bor (ÖAB), Etibor-48 (Boraks Pentahidrat) (BP) ve Etibor-68 (Susuz Boraks) (SB) malzemeler kullanarak elde edilen asfalt beton numunelerinin performansları araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre; üç malzemenin de kullanımının gerekli şartnamelere uygun olduğu ispatlanmıştır. Bor atığı kullanımı ile çevresel kirlilik önenebilecek ve sürdürülebilir yaşam sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt Betonu, Bor, Atık, Sürdürülebilir Yaşam

Performance Evaluation Of Asphalt Concrete Containing Boron Wastes

Abstract

Nowadays, especially while the effects of global warming increase from day to day, the concept of waste recycling in the field of civil engineering, also in other areas, has become crucial. Transportation engineers carry out scientific studies in the production of asphalt concrete with recyclable waste materials and also apply their work in the construction site. The purpose of this paper is to find out possible recycling methods of the waste storage, which causes the environmental contamination and to determine the ways to reuse them in asphalt production. Eskişehir and nearby cities stands out with over 70% of the world's boron mineral reserves, that, rises the necessity to develop its active use in the road construction industry. In this study, the usability evaluation of asphalt specimens obtained in the result of adding, in the following percentages (5%,10% and 15%), of Crushed Waste Boron(ÖAB), Borax Pentahydrate(BP) and Borax Anhydrous(BA) used instead of passed-through the 1.18mm sieves fine aggregate and filler, was investigated. The results of the study has shown, that all three waste boron types, meet the required criteria. The reuse of boron waste will help to prevent contamination of the environment and to lead sustainable living.

Keywords: Asphalt concrete, boron, waste, sustainable living.

1. Giriş

Geri dönüşüm, atık malzemelerin yeni ürünlerde kullanılabilir şekilde kurtarılması ve yeniden kullanılmasıdır[1]. Yol mühendisleri uzun yıllardır doğadaki atık malzemeleri geri dönüşüm vasıtasıyla sektöre kazandırmaya çalışmaktadırlar. Son yıllarda bor mineraline

sahip ülkelerde önemli derece bor atığı yığınları oluşmaktadır. Dünya bor rezervinin %72 si Türkiye'de bulunmaktadır[2]. Bu sebeple Türkiye'de dünyanın en büyük bor atıklarının oluşması kaçınılmaz olmuş ve oluşan atık depoları ülkede önemli yer işgal etmektedir. Sadece Eskişehir, Kırka'da yıllık 400.000 ton bor atığı oluşmaktadır[3]. Bu atıklar sektörde farklı

çalışmalar ile kullanılmaya başlanmıştır[4] (Şekil.1).



Şekil 1. Atık bor sahası

Atıkların asfalt betonunda kullanılmaya başlanması 2000li yılların başlarında olmuştur. Yapılan çalışmalarda boraks, sepiolit, zeolit, atık lületaşı ve sediman yakma taban külü(sediment incineration bottom ash=SIBA) kullanarak bu malzemelerin asfalt karışımlarda kullanılabilme olasılığı araştırılmıştır. Bu malzemelerin dolaylı çekme dayanımını ve birim ağırlık değerlerini azalttığı, akma değerlerini ise artırdığı tespit edilmiştir. Farklı atık oranlarında hazırlanan numunelerde Marshall Stabilité değerinin sepiolitte artış gösterdiği, boraks, zeolit, lületaşı ve SIBA ile hazırlanan numunelerde ise azaldığı belirtilmiştir[5]. 2013 yılında yapılan başka bir çalışmada ise asfalt betonu karışımlarda filler malzemesi olarak bor atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atıkları değerlendirmek amacıyla yapılan bu çalışmada bor atıklarının asfalt kaplamalarda alternatif filler olarak kullanılabilceği belirtilmiştir[6]. 4 farklı bor minerali ile yapılan farklı bir çalışmada ise bor modifiyeli bitümlerin reolojik özellikleri incelenmiş, minerallerin bitüm ile elektrostatik kimyasal bağ oluşturduğu belirtilmiştir. Bor ile bitüm modifiyesi; penetrasyon değerlerini düşürmüş, yumuşama noktası ve parlama noktası değerlerini artırmıştır. Sonuçta rijitlik değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Dinamik kayma reometresi deney sonuçlarına göre ise kompleks modül (G^*) değerleri artmış, faz açısı (δ) değerleri azalmış yani oluklanma

direnci artmıştır. Dönel vizkozimetre (RV) deney sonuçlarına göre ise bütün modifiye bitümlerin viskozite değerleri artmıştır[7]. Gürer ve Selma tarafından yapılan bir çalışmada belirli oranlarda filler malzeme ile yer değiştirilen bor atıklarının asfalt betonu karışımına etkileri incelenmiş, atıklar ile hazırlanan asfalt betonu karışımların yol üst yapısında şartnameler dahilinde kullanılabilceği gösterilmiştir[8]. Çin’de oluşan bor atıklarının değerlendirilmesi amaçlı yapılan çalışmada bor atıklarının yol altyapısında kullanılabilirliği araştırılmış ve bu atıkların alt yapıda direk olarak kullanılabilceği ispatlanmıştır[9].

Bu çalışmada 1.18mm’lik elek altında kalan ince ve filler malzemeler; öğütülmüş atık bor için %5, 10 ve 15 oranlarında, Boraks Pentahidrat ve Susuz Boraks için %5 ve % 10 oranlarında yer değiştirilerek karışımlar oluşturulmuştur. Dolayısıyla karışım modifiyesi söz konusudur. Numuneler Marshall tasarım yöntemi ile hazırlanmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirme esnasında Boraks Pentahidrat ve Susuz Boraks katkılı numuneler %10 katkı oranından sonra Öğütülmüş Atık Bor katkılı numuneler ise %15 katkı oranından sonra dayanımlarını kaybetmeye başladıkları için katkı oranları bu yüzdelerde kesilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen sonuçlar ışığında, bor atıklarının ince agregata ve filler olarak asfalt betonlarında kullanılabilceği ispatlanmıştır. Bu sayede bor maden yatakları ve fabrikalarının bulunduğu yerlerde oluşan görsel ve çevresel kirlilik önenebilecektir. Atık bor kullanımı ile tüm dünya ülkelerince önümüzdeki yıllar için prensip haline gelen sürdürülebilir yaşam konusunda büyük faydalar sağlanabilecektir. Çalışmanın sonraki aşamalarında atık bor katkılı bitüm ve karışım numunelerinin dinamik ve statik sünme performans sonuçları değerlendirilecektir.

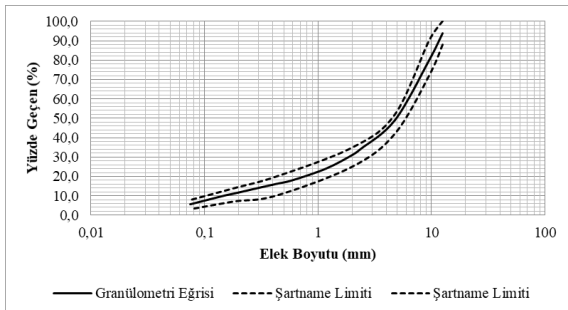
2. Malzeme

Bu çalışmada agregata olarak kireçtaşı kullanılmış, bitüm olarak ise İzmit Tüpraş rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Agregata gradasyonu seçilirken Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen aşınma tabakaları için TİP-1 gradasyon limitleri aralığında kalınmıştır.

Agregata deney sonuçları Tablo.1 ile agreganın dane dağılımı eğrisi ise Şekil.2 ile verilmiştir. Tablo.2 ve Tablo.3’ de ise sırasıyla bitümlerin reolojik özellikleri ve atık borun fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Agreganın fiziksel özellikleri

Özellik	Değerler	Şartname Limiti	Standart
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)			
Kaba Agregata	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,688	TİP-1
	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,745	TİP-1
	Yaş Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,709	TİP-1
İnce Agregata	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,618	TİP-1
	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,729	TİP-1
	Yaş Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,659	TİP-1
Filler	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,688	TİP-1
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	1,469	-	ASTM C 29
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	1,227	-	ASTM C 29
Los Angeles aşınma (%)	12,8	≤27	ASTM C 131
Yassılık indeksi (%)	16	≤20	ASTM D 4791
Donma-Çözünme direnci (%)	4	-	ASTM C 88

**Şekil 2.** Dane dağılımı eğrisi**Tablo 2.** Bitümün Reolojik Özellikleri

Deney	Değer	Şartname Limiti	Standart
Bitüm Kaynağı	Tüpraş, İzmit, Türkiye	-	
Penetrasyon (25°C, 100 gr)	64(50/70)	50-70	ASTM D5
Yumuşama Noktası (°C)	48	46-54	ASTM D36/D36M-09
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,028	-	ASTM D70-09e1
Düktilite (25°C, 5 cm/min)	>100 cm	≥100	ASTM D113-07
Isınma Kaybı (%)	0,43	≤0,5	ASTM D6-95
Parlama Noktası (°C)	314	≥230	ASTM D92-05a
Viskozite (135°C' de, cP)	437,5	-	ASTM D4402-06
Viskozite (165°C' de, cP)	137,5	-	ASTM D4402-06

Tablo 3. Atık Bor özellikleri

	ÖAB	BP	SB
Gevsek BHA, gr/cm ³	1,086	0,982	1,099
Sıkı BHA, gr/cm ³	1,263	1,088	1,268
Renk	Krem	Beyaz	Beyaz
Özgül ağırlık, gr/cm ³	1,161	1,150	1,123

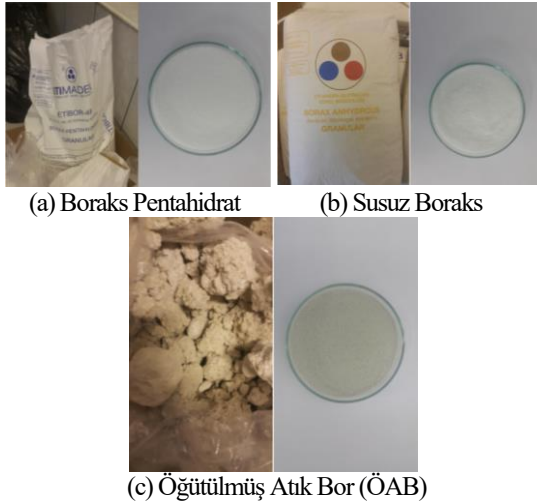
3. Marshall Tasarım Metodu

Bu çalışmada öncelikli olarak malzemelerin fiziksel ve mekanik davranışlarını anlamak ve optimum bitüm oranını (OBO) bulabilmek için Marshall tasarım metodu kullanılmıştır. Marshall tasarımı 1940lı yıllardan beri kullanılmakta olan bitümlü sıcak karışım tasarım metodudur. Asfalt betonu içinde kullanılacak optimum bitüm miktarını tayin etmek üzere yapılan bir deneştir. Bu deney; dane boyutu filler (0.075mm) ve 25 mm arasında değişen, belli bir granülometriye sahip agregalardan oluşan bitümlü karışımların dayanım, akma ve numune özellikleri hakkında sonuçlarının elde edilmesini sağlar[10,11].

Karışımlar 160°C'lik etüvlerde bekletilen malzemeler ile hazırlanmış, karışım sıcaklığı olarak

ise 135°C seçilmiştir. 1150gr agrega ile %3.5 ile %6.5 arası %0.5'lik artış ile kullanılan bitüm oranı ile hazırlanan karışımlar ağır trafik hacimli yollar için 75 vuruş değeri seçilerek oluşturulmuştur.

Marshall tasarımına göre 42 adet kontrol numunesi ve değişik tür ve oranlarda 147 atık bor katkılı modifiye numune hazırlanmıştır. 1.18mm'lik elek altında kalan ince agrega ve filler malzemenin bor atıkları ile değiştirilmesi neticesinde oluşturulan numuneler birbiri ile kıyaslanmıştır. Eti Kırka madenlerinden getirilen Boraks Pentahidrat (Şekil.3a) ve Susuz Boraks (Şekil.3b) malzemelerinin dane dağılımlarına incelendiğinde 1.18mm'lik elekten tamamının geçtiği görülmüştür. Dolayısıyla bu elek altında kalan tüm malzemenin karışıma katılması uygun görülmüştür. ÖAB malzemesi ise doğada toprak halde bulunmaktadır. Bu atıklar Los Angeles deney aleti ile yaklaşık 45 dakikalık bir öğütülme işlemi sonrası Şekil.3c' de görüldüğü haline getirilmiş ve yine 1.18mm'lik elek altında kalan kısımlar deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan malzemelerin özgül ağırlık tayini yapılmış, bulunan değerler hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan bor türleri

Farklı oranlardaki ÖAB ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.4' te verilmiştir. Bütün numunelerde Marshall dayanımı 900 kg dan yüksek çıkmıştır. Dayanım açısından şartname değerleri sağlanmaktadır. ÖAB atık oranı arttıkça karışımların özgül ağırlıkları azalmakta, boşluk oranları artmaktadır. Akma değerleri şartname sınırları (2-4mm) içerisindeydir. Ancak atık bor ilavesi ile numunelerin akma değerleri artmakta, dayanımlar azalmaktadır. Bu sonuçlar bize ÖAB içeren

numunelerin rijitliğinin daha az olduğunu göstermektedir.

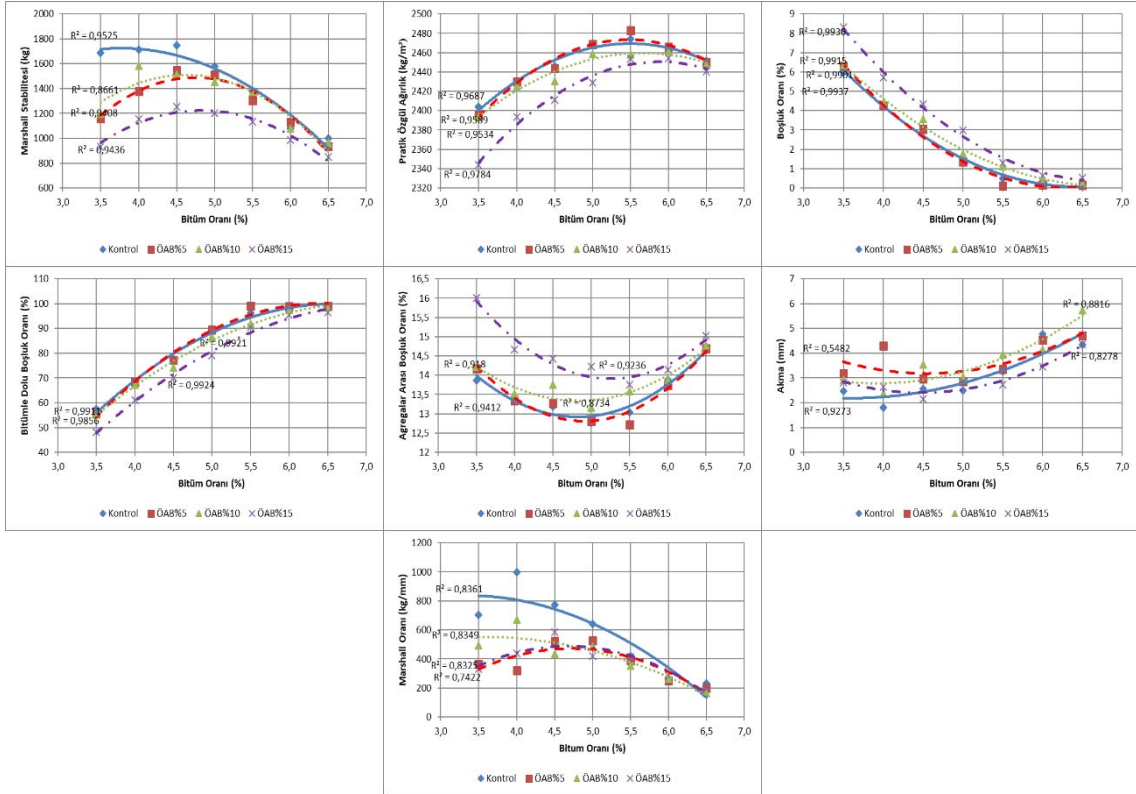
SB katkısı ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.5' te verilmiştir. Numuneler 900 kg lık Marshall dayanımı şartını sağlamaktadır. Karışımındaki SB oranı arttıkça karışımların özgül ağırlıkları azalmakta, boşluk oranları artmaktadır. Akma değerleri şartname sınırları (2-4mm) içerisinde ve kontrol numunelerine yakın değerlerdir. Düşük bitüm oranlarında SB ilavesi ile dayanımlar azalmakta, yüksek bitüm oranlarında dayanımlar tüm numunelerde birbirine yakın değerlere sahip olmaktadır. Numunelerin rijitliği içinde aynı gözlem sonuçları elde edilmiştir.

BP katkısı ile modifiye edilmiş asfalt beton numunelere ait Marshall tasarım deney sonuçları Şekil.6' da verilmiştir. BP katkılı numuneler; genel olarak SB içeren numuneler ile aynı benzer özellikleri göstermektedir.

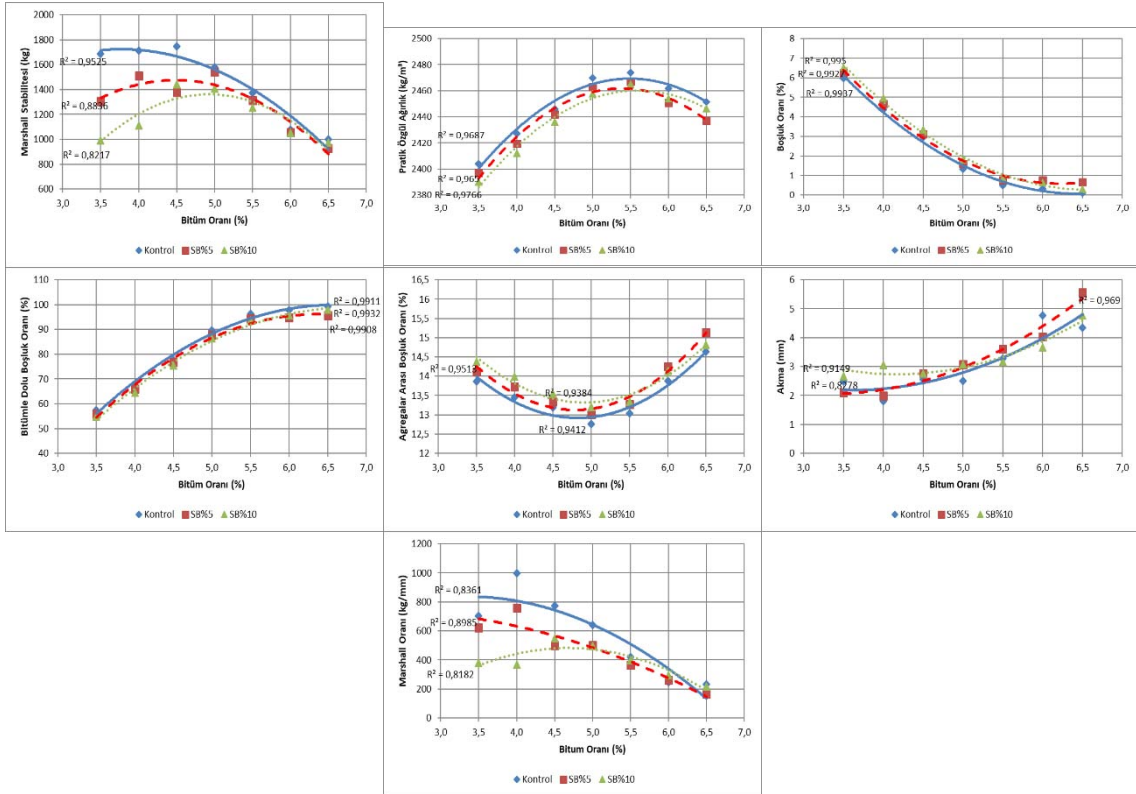
ÖAB katkılı numunelerde %15, SB ve BP katkılı numunelerde %10 oranında katkı ilavesinden sonra dayanım değerleri düştüğü için katkı artırımına gidilmemiştir. Bor atıklarının kullanıldığı katkı içeren ve normal katkı içermeyen numunelerin karşılaştırılmalarına ait sonuçlar Şekil.7'de verilmiştir.

Karşılaştırmalı değerlendirmeler için %10 katkı oranları kullanılmıştır. Bunun sebebi kullanılan katkıların elde edilme maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere; ÖAB numuneleri dayanım yönünden kontrol numunelerine en yakın sonuçlara sahiptir. SB ve BP içeren numunelerde, katkı oranı arttıkça dayanım düşmektedir. Özgül ağırlık azalmakta ve boşluk oranları artmaktadır. Ayrıca SB ve BP içeren numunelerin rijitlik değerleri de düşüktür. SB ve BP katkısı içeren numunelere göre ÖAB numuneleri ekonomiklik ve çevreyi en az kirletme bağlamında daha fazla fayda sağlayacaktır. ÖAB içeren numuneler aşınma ve binder tabakaları için gerekli olan şartname değerlerini sağladıkları için, asfalt beton uygulamalarında kullanılabilir niteliğe sahiptirler.

Kontrol ve atık bor içeren numuneler için her bir serinin optimum bitüm oranı (OBO) değeri hesaplanmıştır. OBO değerleri hesaplanırken Stabilité ve Birim Ağırlık değerlerinin maksimum değerleri, hava boşluğu için %4 ve asfaltla dolu boşluk oranı için %70 değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdesi değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Numunelerin OBO değerleri Tablo.4'de verilmiştir. OBO değeri bor katkı oranı arttıkça yükselmektedir.

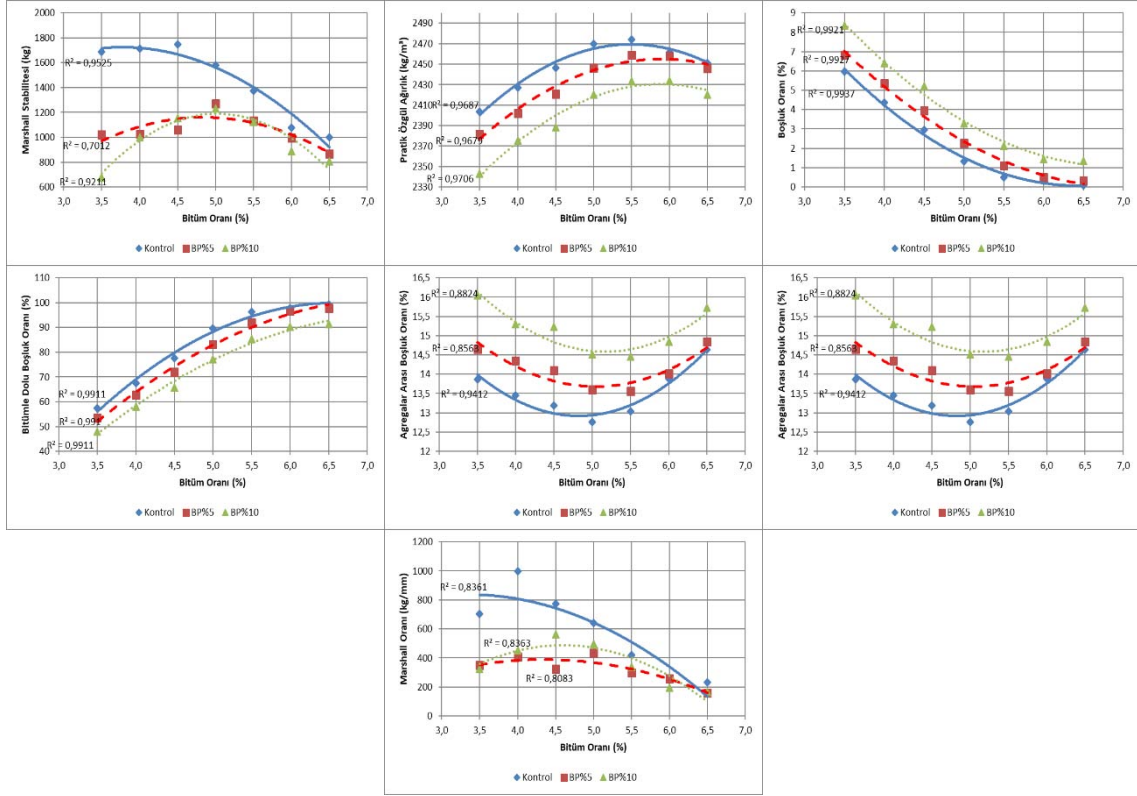


Şekil 4. Farklı oranlardaki ÖAB katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

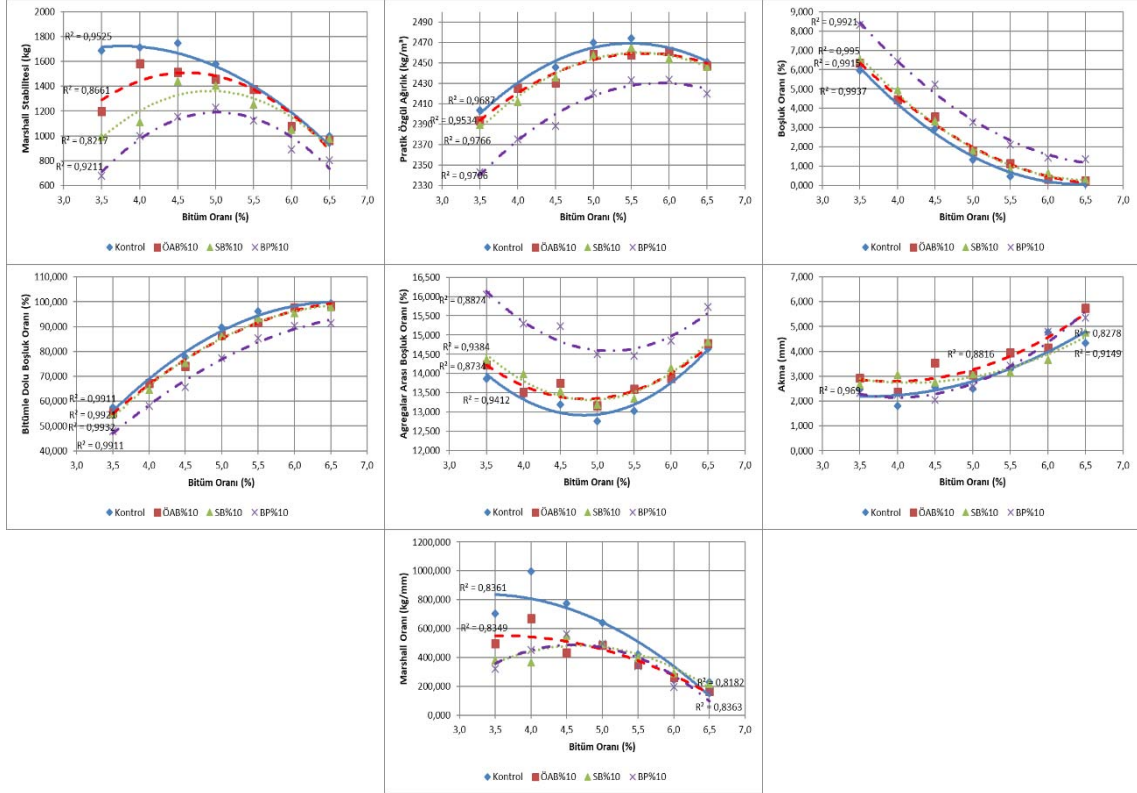


Şekil 5. Farklı oranlardaki Susuz Boraks katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Atk Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi



Şekil 6. Farklı oranlardaki Boraks Pentahidrat katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 7. %10 oranında bor atıkları kullanılarak hazırlanmış katkıli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Tablo 4. Optimum bitüm oranı değerleri

Malzeme	Katkı oranı (%)	Optimum Bitüm Oranı (OBO) (%)
Kontrol	0	4.34
ÖAB	5	4.59
ÖAB	10	4.66
ÖAB	15	4.92
SB	5	4.53
SB	10	4.73
BP	5	4.85
BP	10	5.07

4. Ekonomik Değerlendirme

Çalışmada ekonomik değerlendirme için 1km uzunluğunda yol(10m genişliğinde 15cm kalınlığında) için maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuçlar katkısız ve % katkı oranlarında ÖAB, SB ve BP için ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 5' te verilmiştir.

1 km yol için;

Hacim(V)=1000mx10mx0.15m=1500m³

Asfaltın özgül ağırlığı $\gamma=2,5$ t/m³ kabul edilerek

Toplam ağırlık = 1500 * 2,5 = 3750t olur.

Katkısız asfalt için;

Numune;

Agrega; 1150 gr

Bitüm; %4,34 (49,91 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1199,91 gr olur.

3750t katkısız asfalt betonu için;

Agrega; 1150 * (3750 / 1199,91) = 3594 ton

Bitüm; 49,91 * (3750 / 1199,91) = 156 ton

%10 ÖAB katkılı asfalt betonu için;

Numune;

Agrega; 1122,4 gr

ÖAB; 27,6 gr

Bitüm; %4,66 (53,59 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1203,59 gr olur.

3750t %10ÖAB katkılı asfalt betonu için;

Agrega; 1122,4 * (3750 / 1203,59) = 3497 ton

ÖAB; 27,6 * (3750 / 1203,59) = 86 ton

Bitüm; 53,59 * (3750 / 1203,59) = 167 ton

Tablo 5. Maliyet hesapları

EKONOMİK ANALİZ		Agr. (t)	Bitüm (t)	Katkı (t)	TOPLAM (t)	Maliyet Artışı (%)
KATKISIZ (OBO:%4,34)	Miktar	3594	156	0	3750	0
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	0	1519	
	Maliyet (TL)	57.504	234.468	0	291.972	
%10ÖAB KATKILI (OBO:%4,66)	%10 ÖAB	3497	167	86	3750	5
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	10	1524	
	Maliyet (TL)	55.952	251.001	860	307.813	
%10SB KATKILI (OBO:%4,73)	%10 SB	3495	169	86	3750	7
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	15	1534	
	Maliyet	55.920	254.007	1.290	311.217	
%10BP KATKILI (OBO:%5,07)	%10 BP	3483	181	86	3750	13
	Birim Fiyat (ton/TL)	16	1503	15	1534	
	Maliyet (TL)	55.728	272.043	1.290	329.061	

Agrega fiyatı =12 TL/ton

Agrega nakliye ücreti = 4TL/ton (Eskişehir Merkez için)

İzmit rafineri bitüm fiyatı = 1470TL/ton

Bitüm nakliye ücreti = 0,15TL/ton/km

Bitümün nakliye ücreti (İzmit-Eskişehir merkez, 217 km) = 217*0,15=32.55 TL/ton

Öğütülmüş Atık Bor fiyatı (öğütme) = 5 TL/ton

SB ve BP atık bor fiyatı (paketleme) = 10 TL/ton

Atık bor nakliye ücreti= 5 TL/ton (Eskişehir Merkez için)

Katkısız asfalt betonu için maliyet:

$[3594 * (12+4)]+[156 * (1470+32.5)] = 291.972$ TL olarak bulunur.

%10 ÖAB katkılı asfalt betonu için maliyet:

$$[3497 * (12+4)]+[167 * (1470+32.5)]+[86 * (5+5)]=307.813 \text{ TL olarak bulunur.}$$

1 km' lik yol için uygulanan hesaplar sonucunda, katkısız asfalt betonuna göre, ÖAB, SB ve BP atık içeren karışımlar için sırasıyla %5, 7 ve 13 oranlarında maliyet artışı gerçekleşmiştir. Bu durumda ÖAB atıklarının asfalt betonunda kullanımı daha ekonomik olacaktır. Çevresel etki ve sürdürülebilirlik bağlamında 86 ton atık borun geri dönüşümü sağlanabilecektir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada yaklaşık 170 adet asfalt betonu numunesi hazırlanmış, bor katkısı ile hem asfalt betonunun performansını arttırmak hem de ekonomik ve çevresel kazanımlar hedeflenmiştir. Bu katkı ile geri dönüştürülebilir malzemeler sektörün kullanımına sunulmaya açılmaya çalışılmış ve aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

* Optimum bitüm oranları bor katkı oranı arttıkça, yükselmektedir.

* SB ve BP katkı ilavesi asfalt beton numunelerin özgül ağırlık ve boşluk oranlarını azaltmakta, dayanımı ve rijitliği düşürmektedir. Bu yüzden asfalt betonunda kullanımları uygun değildir.

* SB ve BP katkı maddeleri işlenmiş malzemelerdir. Bu malzemelerin asfalt betonu yerine farklı alanlarda kullanımı daha faydalı olacaktır.

* ÖAB içeren numuneler ile kontrol numunelerin deney sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

* ÖAB katkısını ilavesi ile optimum bitüm oranındaki artış oldukça düşüktür. ÖAB atığının asfalt betonunda kullanımı ile her 1 km yol için 86 ton atık değerlendirilmiş olacaktır. Elde edilen bu yakın sonuçlar ekonomiklik ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından oldukça değerlidir. Bu sonuçlar ÖAB un asfalt betonunda kullanılabilmesinin bir göstergesidir.

6. Kaynakça

1. Recycling. Encyclopædia Britannica (2018).
2. Banar, M., Güney, Y., Özkan, A., Günkaya, Z., Bayrakçı, E. and Ulutaş, D. (2016). Utilisation of waste clay from boron production as a landfill liner material. *Int. J. Mining, Reclam. Environ.* **200**: 1–17.
3. Karasu, B., Kaya, G., Yurdakul, H. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantre ve türev atıklarının duvar karosu bünye özelliklerine etkisi. *1.Uluslararası Bor Sempozyumu, (3-4 Ekim 2002) Bildirileri*, Kütahya, 224-228.
4. Oruç, F., Sabah, E., Erkan E. (2004). Türkiye'de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirme Stratejileri. *2.Uluslararası Bor Sempozyumu, (23-25 Eylül 2004) Bildirileri*, Eskişehir, 385-393.
5. Karacasu, M., Koyuncu, H., Bakış, R., Taşpolat, L.T., Yılmaz, G. (2004). The use of Borax, Sepiolite, Zeolite, Waste Meerschaum and Contaminated River Sediment in Asphalt Concrete Mixtures. *2.Uluslararası Bor Sempozyumu, (23-25 Eylül 2004) Bildirileri*, Eskişehir, 441-447.
6. Kütük-Sert, T. & Kütük, S. (2013). Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **25(2)**:266–273.
7. Oruç, Ş., Yılmaz, B. & Sancak, K. (2016). Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Road Mater. Pavement Des.* **17(4)**:810–824.
8. Gürer, C. & Selman, G. Ş. (2016). Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Medziagotyra* **22(1)**:118–125.
9. Zhang, Y. et al. (2016). Reuse of boron waste as an additive in road base material. *Materials (Basel)*. **9**:1-15.
10. Karacasu, M. (2016). Yol Üstyapı Deneyleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 207s.
11. Keskin, M. (2011). Superpave ve Marshall dizayn yöntemleri ile üretilmiş asfalt numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılıkların belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 280s.