



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>

Parke taşı üretiminde kükürt polimer beton kullanımının araştırılması

Onur Öztürk^{a,*}, Adnan Öner^a

^aKocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli 41001, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Ağustos 2023

Düzeltilme 3 Ekim 2023

Kabul 24 Ekim 2023

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Kükürt

Aşınma

Parke taşı

Dayanım

Bitüm

ÖZET

Bu deneysel çalışma kapsamında geleneksel Portland çimentosu yerine petrol endüstrisinde yan ürün olarak açığa çıkan kükürte, inşaat sektöründe alternatif kullanım alanı oluşturmak için beton olarak kullanılması amacıyla yaygınlaşan kükürt polimer betonlardan (KPB) üretilen parke taşlarının yol kaplamasında kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada; bitüm ile modifiye edilen KPB kullanılarak hazırlanan parke taşları üzerinde böhme aşınma dayanımı, ağırlık kaybı, basınç ve yarmada çekme dayanımı, su emme oranı ile görünür porozite deneyleri yapılmıştır. KPB parke taşlarının deneysel sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için aynı basınç dayanımına sahip Portland çimento betonu (PÇB) numuneleri hazırlanmış ve Marmara bölgesinde bulunan 2 farklı firmadan fabrikada üretilmiş olan ve uygulamada kullanılan prizma parke (PP) ve kilitli parke (KP) numuneleri temin edilerek aynı deneyler bu numuneler üzerinde de yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda PP ve KP numunelerinden elde edilen hacim kaybı değerinin KPB'lerde meydana gelen aşınma miktarının yaklaşık olarak 7 katı olduğu ve kükürt bağlayıcılı beton kullanımı ile aşınmanın %86 oranında azaltılabileceği görülmüştür. PÇB'lerin KPB'lere oranla daha boşluklu olduğu ve bu nedenle KPB'lerin diğer numunelere göre su emme oranlarının daha düşük seviyede olduğu sonucuna varılmıştır. KPB parke taşların ilgili standartlarda verilen limit değerleri sağladığı ve yol kaplaması olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Investigation of the use of sulfur polymer concrete in paving stone production

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 August 2023

Received in revised form 3 October 2023

Accepted 24 October 2023

Available online

Keywords:

Sulfur

Abrasion

Paving stone

Strength

Bitumen

ABSTRACT

Within the scope of this experimental study, it is aimed to investigate the usability of paving stones produced from sulfur polymer concrete (SPC), which has become widespread to use sulfur, which is released as a by-product in the petroleum industry instead of traditional Portland cement, as concrete to create an alternative usage area in the construction industry. In this study, Bohme abrasion rate, weight loss, compressive strength, splitting tensile strength, water absorption rate, and apparent porosity tests were carried out on paving stones prepared using SPC modified with bitumen. Portland cement concrete (PCC) samples with the same compressive strength were prepared and locked parquet (LP) and prism parquet (PP) samples, which were produced in the factory and used in the application, were obtained from 2 different companies in the Marmara region and the same experiments were carried out also done on these samples to compare the experimental results of SPC paving stones. As a result of the abrasion rate tests, it was seen that the volume loss value obtained from the PP and KP samples is approximately 7 times the amount of wear in the KPBs, and the wear can be reduced by 86% with the use of sulfur-based concrete. It was concluded that PCC has more voids than SPC, and therefore, water absorption rates of SPC are lower than other samples. It was determined that SPC paving stones meet the limit values given in the relevant standards and can be used as road pavement.

I. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketimi gün geçtikçe hızla artmakta ve bu enerji ihtiyacının da önemli ölçüde petrol endüstrisinden karşılanmaktadır. Bunun sonucu olarak petrol endüstrisinden yan ürün olarak açığa çıkan kükürt miktarı artmaktadır. Artan kükürt rezervleri, depolama alanı sıkıntıları ile kükürt kullanımı için alternatif yeni uygulama alanlarının bulunmasını zorunlu hale getirmiştir. Son yıllarda kükürt, özellikle inşaat yapım teknolojileri içinde bazı uygulamalarda iyi bir alternatif yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir [1-3].

Bağlayıcısı kükürt olan betonlar geleneksel Portland çimento betonlarında bağlayıcı olarak kullanılan su ve çimento yerine kükürt kullanılarak hazırlanan yüksek performanslı termoplastik kompozit malzemelerdir. Kükürtün yapı inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılması hususunda ilk çalışmalar saf kükürt kullanılarak hazırlanan betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir [4]. 1920 ile 1960 yılları arasında yapılan çalışmaların hedefi kükürtün geleneksel PÇB'ye alternatif olarak inşaat teknolojilerinde kullanılabileceğinin gösterilmesiydi. Saf kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt betonlarda kükürtün soğuması ile içyapıda gerçekleşen faz dönüşümü nedeniyle kısa sürede parçalanma ve göçmelerin meydana geldiği ve oldukça düşük durabilite performansına sahip oldukları belirlenmiştir. Dayanım ve dayanıklılık kaybına yol açan bu faz dönüşümünün engellenebilmesi için kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonun kontrol altına alınarak saf kükürt modifiye edilmiştir [5, 6]. Kimyasal olarak kontrolde en yaygın olarak kullanılan kimyasallar disiklopentadien (DCPD) [7] ve DCPD, siklopentadien ve dipenten kombinasyonlarıdır [8]. Fiziksel kontrol ile kükürt modifikasyonunda ise saf kükürt, olefin hidrokarbon polimerleri ve uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör ile birleştirilmektedir. Bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan olefin hidrokarbon polimerleri RP220, RP020, Escopol ve bitüm [8] olarak özetlenebilmektedir.

Modifiye kükürt (MK) kullanılarak hazırlanan KPB'ler, birçok özel mühendislik uygulamasında geleneksel PÇB'ye alternatif bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. İçeriğinde su kullanılmaması, bağlayıcı olarak kükürt kullanılması, soğutma ile katılaşması ve kükürtün ay yüzeyinde serbest bir element olarak bulunması nedeniyle KPB'ler uzayda yapılacak inşaat uygulamalarında öne çıkmaktadır [9]. Aynı zamanda KPB, hızlı kuruma süresi ve mukavemet kazandırma özelliği dikkate alınarak 3D yazıcı teknolojilerinde de kullanım alanı bulmuştur [10]. Ayrıca literatürde uçucu kül ve geri dönüştürülmüş agrega [7], elektrolitik manganez kalıntısı [11], atık ilmenit çamuru [12] gibi atık maddelerin değerlendirilmesine yönelik deneysel çalışmalar da bulunmaktadır. KPB'lerin aşınmaya karşı dirençlerinin yüksek olduğu bilinmektedir, bu nedenle yol kaplaması ve beton kaplama blokları olarak kullanılabilirliği konusunda Al-Otaibi vd. tarafından 2018 yılında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir [13]. Yapmış oldukları bu deneysel çalışmada farklı karışım oranlarına sahip KPB kullanılarak hazırlanan beton yol kaplaması numunelerinin basınç, eğilme dayanımı ve su emme oranları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda KPB kullanılarak hazırlanan beton yol kaplama bloklarının kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir. Kükürtün bağlayıcı olarak kullanıldığı ilk inşaat uygulaması 1975 yılında Sulfurcrete Products şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir [14]. Korozif etki dayanıklılığı göz önünde bulundurularak kükürt betonlar ile 1977 yılında çelik yapı kolon temeli, prefabrik asit tankı ve saha betonu uygulamaları yapılmıştır [15]. Tokyo'da bulunan Nippon Petrol Şirketi tarafından 2008 yılında prefabrik olarak kanalizasyon boru ve bacası imalatı gerçekleştirilmiş ve ilk saha uygulaması aynı yıl içinde Al Ain, Birleşik Arap Emirlikleri'nde yapılmıştır [16]. Modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanmış olan asfalt betonuna ait ilk saha uygulaması 2007 yılında Katar'da gerçekleştirilmiştir [17]. Prefabrik parke zemin kaplaması kullanılarak Katar'da ilk saha uygulaması 2008 yılında bir oyun parkı içerisinde 16 m²'lik alanda uygulanmıştır [18]. Ayrıca kükürt betonların geri dönüşümünün geleneksel Portland çimento betonlarına oranla daha iyi olduğu ve sürdürülebilirlik olarak daha büyük avantajlar sağladığı bilinmektedir [19].

Günümüzde birçok ülkede yaygın olarak kullanılmakta olan parke taşları, ülkemizde de tercih edilen yer döşeme ve kaplama malzemesidir. Prefabrik parke taşları; asfalt, beton ve diğer kaplamaların gerektiği her yerde kullanılan ideal bir yol kaplaması olarak kullanılmaktadır. Parke taşları özel ekipman ve araç gerektirmeden basit işçilik ile uygulanabilir olması, bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması ve kısa sürelerde uygulanabilir olması kendine yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [20]. Kilitli parkelerin prefabrik olarak üretim tesislerinde bloklar halinde üretilmesi, sıcak döküm olarak gerçekleştirilen ve katılaşma süreci ortam sıcaklığından etkilenen kükürt bağlayıcılı betonların bu elemanların üretiminde kullanılmasında tercih edilmesinin önemli nedenlerinden biridir.

Bu çalışmada, hem petrol endüstrisinden yan ürün olarak açığa çıkan kükürte alternatif kullanım alanı oluşturulması hem de KPB'lerin üstün mekanik özellikleri nedeniyle parke taşlarının kullanım ömürlerinin uzatılabilmesi amacıyla KPB kullanılarak hazırlanan parke taşlarının özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bitüm ile modifiye edilen KPB kullanılarak hazırlanan parke taşları üzerinde yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı, su emme oranı ve görünür porozite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda özellikle trafiğe açık yolların yüzeyinin aşınması sonucu oluşan cilalama sonucu fren mesafelerinin oldukça uzadığı ve yol kaplamalarında aşınmanın oldukça önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir [21]. Bu nedenle KPB ile hazırlanan parke taşları üzerinde böhme aşınma dayanımı ve ağırlık kaybı deneyleri de yapılmıştır. KPB parke taşlarının deneysel sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için aynı basınç dayanımına sahip Portland çimento betonu (PÇB) numuneleri hazırlanmış ve Marmara bölgesinde bulunan 2 farklı firmadan fabrikada üretilmiş olan ve uygulamada kullanılan PP ile KP numuneleri temin edilerek aynı deneyler bu numuneler üzerinde de gerçekleştirilmiştir. KPB parke taşlarından elde edilen deneysel sonuçlar PÇB, PP ve KP numuneleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve parke taşları ile ilgili standartlar göz önünde bulundurularak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada bağlayıcısı kükürt olan betonlar ile hazırlanan parke taşlarının özelliklerinin geleneksel Portland çimento betonları ile hazırlanan parke taşları ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle KPB numuneleri hazırlanmış ve basınç dayanımı değeri belirlenmiştir. Doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi için deneme yanılma dökümleri ile aynı basınç dayanımını veren PÇB karışımı belirlenmiş ve o karışım oranları kullanılarak PÇB numuneleri hazırlanmıştır. Aynı zamanda Marmara bölgesinde hizmet veren 2 farklı firmadan uygulamada kullanılan PP ile KP numuneleri temin edilerek bu numunelerin de özellikleri deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırma imkânı elde edilmiştir. Deneysel çalışmada her bir grup numune için 15'er adet olmak üzere toplam 60 adet numune kullanılmıştır.

2.1 Kullanılan Malzemeler

Bağlayıcısı kükürt olan betonların hazırlanmasında Claus prosesi sonucunda Tüpraş-İzmit rafinerisinde yan ürün olarak açığa çıkan pul şeklinde saf kükürt kullanılmıştır. Kullanılan kükürtün saflık oranı %99,8'dir ve Şekil 1'de gösterildiği gibi kükürt iri taneli olarak herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmadan doğrudan rafineriden temin edilmiştir. Kükürt modifikasyonunda da Tüpraş-İzmit rafinerisinden temin edilen yumuşama noktası 49°C, özgül ağırlığı 1,034 gr/cm³ ve 135°C viskozitesi 416 cSt olan 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Bitümün kimyasal analizi sonucunda içeriğinde %3,3 kükürt, %10 hidrojen, % 0,7 nitrojen ve % 79 karbon bulunduğu yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 1. Rafineriden temin edilen saf kükürt

Çalışmada PÇB numuneleri hazırlanırken bağlayıcı olarak kullanılan CEM I 42,5 Portland çimentosu ile KPB hazırlanırken kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Kullanılan uçucu kül (F sınıfı) Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiştir. İki farklı fabrikadan temin edilen KP ve PP numuneleri kendi fabrikalarında üretilmiştir ve bu numunelerin üretilmesinde kullanılmış olan çimento özellikleri de Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve uçucu külün fiziksel-kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler				
İncelenen Maddeler	KPB (Uçucu Kül)	PÇB (CEM I 42,5)	KP (CEM I 42,5 R)	PP (CEM II B-M 32,5 R)
SiO ₂	57,32	22,10	22,90	31,37
Al ₂ O ₃	25,21	4,37	5,57	8,07
Fe ₂ O ₃	6,86	3,30	3,51	3,49
CaO	1,47	65,63	63,11	47,31
MgO	1,86	1,20	2,38	1,58
SO ₃	0,47	2,62	1,82	2,36
Fiziksel Özellikler				
Priz Başlangıcı (<i>h:min</i>)	-	2:59	3:02	2:63
Priz Sonu (<i>h:min</i>)	-	3:20	3:37	4:15
Özgül Yüzey (<i>cm²/gr</i>)	2765	3420	3100	4105
Özgül Ağırlık (<i>gr/cm³</i>)	2,29	3,14	3,11	2,95
Mekanik Özellikler				
7 günlük basınç day. (<i>MPa</i>)	-	47,5	44,7	28,5
28 günlük basınç day. (<i>MPa</i>)	-	58,1	55,6	36,1

Laboratuvar ortamında hazırlanan KPB ve PÇB numunelerinde özellikleri TS EN 932-1 ve TS EN 933-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve Tablo 2’de verilmiş olan aynı agregalar kullanılmıştır [22, 23]. Kullanılan kırmataş ve kumun sırasıyla özgül ağırlıkları 2,68 ve 2,60 gr/cm³, maksimum dane çapı 14,3 ve 3,7 mm ve incelik modülleri ise 4,88 ve 2,28 olarak bulunmuştur. İki farklı fabrikadan temin edilen KP ve PP numunelerinde kullanılmış olan agregaların özellikleri de Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Agregaların granülometrik özellikleri

Elek Altına Geçen Malzeme (%)							
Elek (mm)	KPB ve PÇB		KP			PP	
	Kum	K.taş NO.I	Kum	K.taş NO.I	K.taş NO.II	Kum	K.taş NO.I
16	100	100	100	100	88	100	100
8	100	75	100	94	7	100	100
4	100	33	98	10	1	99	56
2	70	2	68	3	1	94	3
1	50	1	32	2	0	78	0
0,5	34	1	21	1	0	52	0
0,25	19	1	11	1	0	10	0
İncelik Modülü	2,28	4,88	2,70	4,89	6,03	1,67	4,41

2.2. Numunelerin Hazırlanması

KPB numunelerinin hazırlanmasında; bağlayıcı olarak saf kükürt ve bitüm kullanılarak modifiye edilmiş olan modifiye kükürt (MK), uçucu kül, ince agrega olarak kum ve iri agrega olarak kırmataş kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan MK literatürde açıklanmış olan yöntemlere uygun olarak saf kükürte ağırlıkça %2,5 oranında bitüm ilave edilerek hazırlanmıştır [2, 5, 8]. KPB dökümleri Şekil 2’de gösterilen sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı

Kükürt bağlayıcılı betonlarda sıcaklığın önemli bir faktör olmasından dolayı karışım süresince sıcaklık 135-140°C arasında sabit tutulmuştur. Karışımlar hazırlanırken kullanılan agregalar, uçucu kül, tüm karıştırma ekipmanları ve kalıplar 135°C etüv içerisinde 2 saat süre ile ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcıya konularak sıcaklık sabit 130-135°C arasında tutulmuş ve saf kükürt sıvı faza getirilmiştir. Saf kükürt eritildikten sonra içerisine etüvde aynı sıcaklık derecesinde ısıtılmış uçucu kül ilave edilmiş, 10'ar dakika düşük ve yüksek hızda toplam 20 dakika karıştırılmış ve karışımın homojen olması sağlanmıştır. Karışımın homojen hale geldikten sonra karışıma saf kükürtün ağırlıkça %2,5'u kadar modifiye kükürt ilave edilmiştir. MK, sıcak karışımı ilave edilerek 10 dakika daha karıştırma işlemi devam etmiştir. Daha sonra mekanik karıştırıcıdaki karışımın içine etüvde ısıtılmış olan agregalar (kum ve kırmataş) ilave edilmiş ve karışım homojen hale gelene kadar en az 20 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Beton karışımı ön ısıtmaya tabi tutulan 71 mm ± 1,5 mm'lik metal kalıplar içerisine doldurulmuştur. Kalıp içindeki KPB karışımı, ısıtılmış demir çubuk ve plastik tokmak kullanılarak kalıba yerleştirme işlemi tamamlanmıştır. Kalıplardaki tüm numuneler laboratuvar ortamında oda sıcaklığında kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. KPB'lere ait karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. KPB'lere ait karışım oranları

	Bağlayıcı (Ağr. %)		Uçucu Kül (Ağr. %)	Agrega (Ağr. %)	
	Saf Kükürt	Modifiye Kükürt		Kum	Kırmataş
KPB	33,95	1,05	35,00	15,00	15,00

Çalışmada ilk olarak KPB'lerin dökümleri gerçekleştirilmiş, bu betonların 28 günlük basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. PÇB'lerin nihai basınç dayanımı değeri KPB'lerden elde edilen 28 günlük ortalama basınç değeri olarak hedeflenmiştir. Burada aynı basınç dayanımı değerindeki KPB ve PÇB'lerin özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. PÇB nihai basınç dayanımı değerinin sağlanması amacıyla gerekli karışım oranları birçok deneme dökümü gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Hedef dayanım yakalanana kadar karışım oranlarında düzenlemeler gerçekleştirilerek deneme dökümleri yapılmıştır. PÇB dökümlerinde de KPB'lerde kullanılmış olan aynı agregalar kullanılmıştır. Dökümü yapılan numuneler, priz süresi olarak 24 saat kalıp içerisinde bekletildikten sonra kalıptan çıkartılarak deneyin gerçekleştirileceği zamana kadar kür havuzlarında bekletilmiştir.

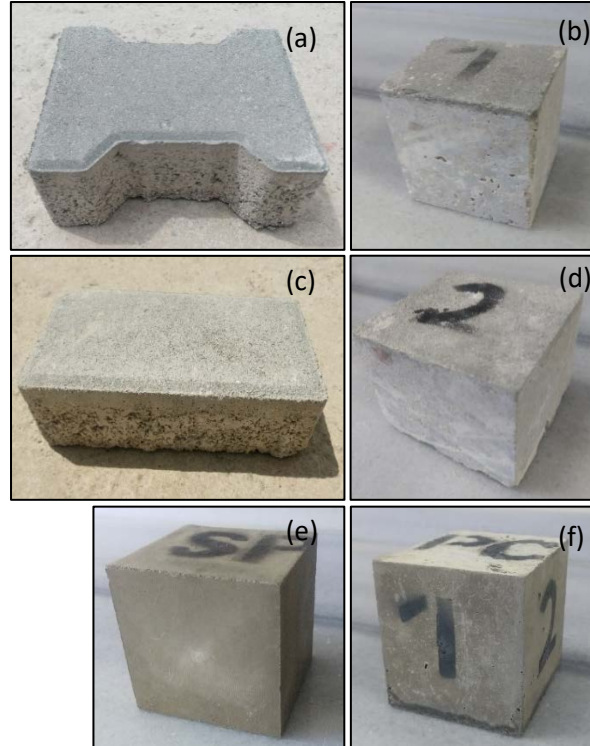
Karşılaştırma amacıyla Marmara bölgesindeki 2 ayrı firmadan uygulamaya hazır olarak alınmış olan PP ile KP numuneleri için de aynı deneyler tatbik edilmiştir. Uygulamada kullanılan parke taşları ile karşılaştırma yapılabilmesi için KP ve PP numunelerinin üretimi numunelerin alındığı fabrikalarda gerçekleştirilmiştir. Standart imalat prosedüründe kullanılan malzemeler ve karışım oranları kullanılarak hazırlanan betonlar, fabrikaların parke

üretim makinaları kullanılarak hazırlanmıştır. Numuneler deneylerin yapılacağı zamana kadar branda ile örtülmüş olarak fabrikaların depolama alanında kürlenmiştir. Burada fabrikaların standart üretim uygulamalarında yaptıkları kürlenme şeklinin uygulanması amaçlanmıştır. 28 gün sonunda fabrikada kürlenmiş olan numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Fabrikaların üretim sırasında kullandığı beton karışım oranları laboratuvarında hazırlanan PÇB karışım oranları ile Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. 1m³ PÇB, KP ve PP teorik karışım miktarları

Malzeme	PÇB	KP	PP
Su/Çimento oranı	0,50	0,40	0,46
Çimento (kg)	400	230	238
Su (lt)	200	92	109
Kum (kg)	673,7	656	906
Kırmataş NO I (kg)	1041,7	678	913
Kırmataş NO II (kg)	-	904	-

KPB ve PÇB numuneleri 71 mm'lik küp kalıplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kilitli ve prizma parke (PP ve KP) numunelerinin döküm ve kür işlemleri alındıkları fabrikada gerçekleştirilmiştir. KP ve PP parke numuneleri 28 günlük kür sonunda 71 mm \pm 1,5 mm boyutunda olacak şekilde kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Tüm numuneler Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3(a)'da kilitli parke ve (b)'de kesilmiş küp numune durumu, (c)'de prizma parke ve (d)'de kesilmiş küp numune durumu ile (e) KPB ve (f) PÇB numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3. KP (a-b), PP (c-d), KPB (e) ve PÇB (f) deney numuneleri

III. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bağlayıcısı kükürt olan betonların yol kaplaması olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla bu deneysel çalışmada dökümleri gerçekleştirilen KPB numuneleri böhme aşınma dayanımı, ağırlık kaybı, yarmada çekme ve basınç dayanımı, su emme oranı ile görünür porozite deneyleri yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla aynı basınç dayanımına sahip PÇB ve ayrıca farklı firmalardan temin edilen PP ve KP numuneleri üzerinde de aynı deneyler

gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler 28 günlük kür süresi sonrası deneylere tabi tutulmuştur. KPB'ler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmış ve havada kürlenmiştir. PÇB'ler laboratuvar ortamında dökümleri gerçekleştirildikten sonra 24 saat kalıp süresi sonrasında kür süresi boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. KP ve PP numunelerinin üretimleri fabrikada gerçekleştirildiğinden bu numunelerde fabrikanın uyguladığı kürleme prosesi uygulanmıştır. Bu numuneler kalıptan alındıktan sonra açık depolama alanlarında naylon ile üstleri kapatılarak 28 gün süre ile kür uygulanmıştır.

Böhme aşınma kaybı deneyleri TS 2824 EN 1338 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [24]. Deneye başlamadan önce deney numunesinin tüm boyutları kumpas yardımıyla kontrol edilmiş ve hassas terazi ile başlangıç ağırlığı belirlenmiştir. 30 ± 1 devir/min sabit hızda dönen döner diskin üstündeki yuvaya yerleştirilen ve üzerinde standart yük bulunan numunede, deney izi üstüne konulan aşındırıcı tozdan dolayı aşınma gerçekleştirilmiştir. Numunenin tüm yüzeylerinde bu işlem 22 devir ve 16 çevrim olarak toplamda 352 devir yapılmış ve deney tamamlanmıştır. Deneye başlamadan gerçekleştirilen ölçümler 16 çevrim sonrasında aşınan numuneler için de tekrarlanmıştır. Deney öncesi ağırlık ölçümü ile 16 çevrim sonrası ağırlık ölçümü yapılarak ağırlık kaybı yüzdesi hesaplanmıştır. Numunelerin hacmindeki azalma (ΔV) ise Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_r} \quad (1)$$

Burada Δm kütle kaybını (16 çevrim sonunda), ρ_r numunenin yoğunluğudur. Küp numunelerinin yarmada çekme dayanımları TS 2824 EN 1338 verilmiş olan Denklem (2) ve (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T = \frac{0,637 * k * P_t}{A} \quad (2)$$

$$A = l * t \quad (3)$$

Burada A yarmada durumunda kırılma alanını, l bloğun kesit uzunluğunu (üstünden ve altından yapılan iki ölçümün ortalaması), t bloğun kırılma düzlemindeki kalınlık (ortadan ve diğer iki taraftan gerçekleştirilen üç ölçümün ortalaması) değeridir. Numunelerin basınç dayanımı değerleri ASTM C-39 standardına uygun olarak yapılmıştır [25]. T, yarmada dayanımı ise göçme yükü (P_t) ve kırılma alanına bağlı olarak hesaplanmıştır. Formüldeki k katsayısı parke taşının kalınlığının düzeltme değeridir ve bu değer TS 2824 EN 1338-Çizelge F.1'den alınmıştır. Küp numuneler değişmez kütleyle ulaşıncaya kadar su içinde bekletilmiştir. Numuneler suda bekletilirken aralarında en az 15 mm ve üzerlerinde de en az 20 mm su tabakası olmasına dikkat edilmiş ve en az 3 gün su içinde bekletilmiştir. Sudan çıkartılan numunenin tüm yüzeylerinde bulunan fazla yüzey suyu nemli bir havlu kullanılarak alınmış ve sonra tartılarak küp numunelerin doygun ağırlıkları (M_d) belirlenmiştir. Numunelerin kuru ağırlıklarının belirlenmesinde, KPB'lerin termoplastik özelliğinden dolayı bozunmalara sebebiyet verebileceğinden etüv kullanılmamıştır. Tüm numuneler laboratuvar ortamında sabit 30°C'deki kapalı bir odada bekletilerek art arda tartımlar ile değişmez kütleyle gelinceye kadar beklenmiştir. Numuneler değişmez kütleyle geldikleri belirlendiğinde kuru ağırlıkları (M_k) belirlenmiştir. Ağırlıkça su emme oranı (S_a) ve görünür porozite (n) değerleri Denklem (4), (5) ve (6) kullanılarak belirlenmiştir.

$$S_a = \frac{M_d - M_k}{M_k} 100 \quad (4)$$

$$V_v = \frac{M_d - M_k}{\rho_w} \quad (5)$$

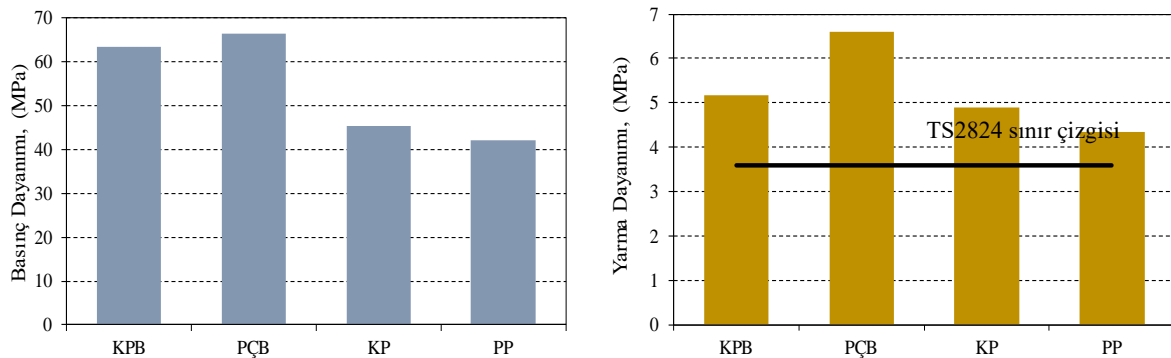
$$n = \frac{V_v}{V} 100 \quad (6)$$

Burada görünen hacim V , boşlukların hacmi V_v ve suyun özgül ağırlığı ρ_w ile temsil edilmiştir. Tüm numunelerin böhme aşınma dayanımı, ağırlık kaybı, basınç ve yarma dayanımı, su emme oranı ile görünür porozite deneylerinden elde edilen sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Basınç ve yarmada dayanımı ile ağırlıkça su emme oranı değerleri 3'er adet, böhme aşınma kaybı deney sonuçları 6'şar adet küp numunenin deneylerinden elde edilen verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Küp numunelere ait deney sonuçları

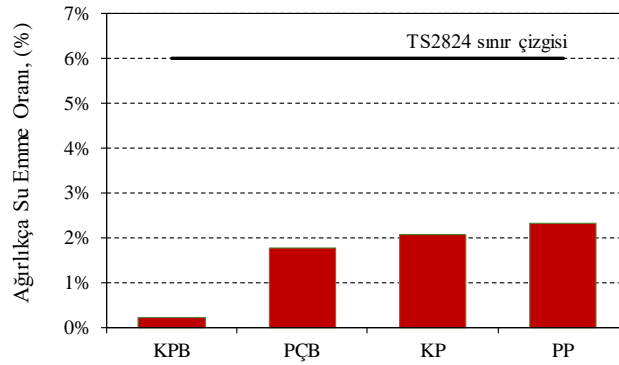
Beton Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Hacim Kaybı ($cm^3/50cm^2$)	Ağırlık Kaybı (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Görünür Porozite (%)
KPB	63,52	5,57	1,90	0,5	0,21	0,95
PÇB	66,44	6,61	9,82	2,4	1,76	4,14
KP	45,44	4,89	13,16	3,0	2,08	4,77
PP	42,10	4,34	14,04	4,1	2,33	5,33

Tüm beton gruplarına ait basınç ve yarmada çekme dayanımı grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te verilmiştir. PP ve KP'nin basınç dayanımı değerleri sırasıyla 42,10 ve 45,44 MPa olarak bulunmuştur. KPB basınç dayanımı değeri sırasıyla 63,52 MPa bulunurken hedef basınç dayanımı KPB ile aynı olması istenen PÇB basınç dayanımı ise 66,44 MPa olarak belirlenmiştir. Beton gruplarına ait basınç dayanımı değerleri incelendiğinde KPB ortalama basınç dayanımı değerinin fabrikada imaları yapılan PP ve KP'lerin basınç dayanımı değerlerinden yaklaşık olarak %40-50 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı değeri KPB, PÇB, PP ve KP için sırasıyla 5,17, 6,61, 4,34 ve 4,89 MPa olarak belirlenmiştir. Beton parke taşlarının yarmada çekme dayanımı değerinin deneyi gerçekleştirilen numunelerin grup ortalamasının 3,6 MPa'ın altında olmaması sınır şartı TS 2824 EN 1338 standardında bulunmaktadır. Standartta verilen limit değer ve numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri göz önünde alındığında tüm beton türlerinin ilgili şartnamede belirtilmiş olan limit değerinin altında olduğu görülmektedir. Grafikler incelendiğinde KPB'lerin yarmada çekme dayanımlarının fabrikada imaları yapılan PP ve KP'lerin yarmada çekme dayanımlarından yaklaşık %6-19 oranlarında daha büyük olduğu belirlenmiştir.



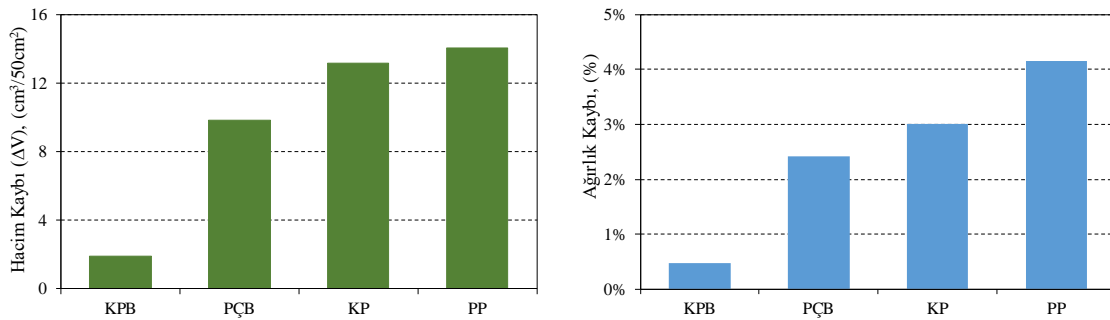
Şekil 4. Basınç ve yarmada çekme dayanımı değerleri

Ağırlıkça su emme oranı deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlar tüm beton numuneleri için Şekil 5'te verilmiştir. PP ve KP numuneleri için ağırlıkça su emme oranı değeri sırasıyla %2,33 ve %2,08 olarak belirlenmiştir. PÇB'lerin su emme oranı %1,76 iken KPB için bu değer %0,21 olarak bulunmuştur. Dökümleri laboratuvarında yapılmış olan KPB ve PÇB'lerin farklı firmalardan alınmış olan parke taşlarına oranla daha boşluksuz olduğu ve bundan dolayı su emme oranlarının daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Parke taşlarının ağırlıkça su emme oranı grup ortalamasının maksimum %6 olması gerekliliği TS 2824 EN 1338 standardında belirtilmiştir. Belirtilmiş olan üst sınır değeri ve numunelere ait ortalama grup değerleri göz önüne alındığında tüm beton türlerinin sınır değerinin altında kaldığı görülmüştür. MK kullanılarak hazırlanmış olan KPB'lerde en düşük su emme oranı değerine ulaşılmıştır. Literatürde yapılmış olan deneysel çalışmalar incelendiğinde KPB'lerin su emme oranlarının yaklaşık olarak %0,28-0,88 aralığında değişkenlik gösterdiği görülmüş ve bu çalışma sonucunda bulunan değerler ile literatürde yapılmış olan çalışmalara ait sonuçların paralellik gösterdiği belirlenmiştir [13]. KPB'lerin geleneksel PÇB'lere göre birçok avantajı olduğu literatürde yapılmış olan deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir [8, 26]. Özellikle kükürtün hidrofob özelliği nedeniyle KPB'lerin su geçirimsizliğinin oldukça düşük olduğu ve bu durumun sonucu olarak ta yüksek durabilite özelliği gösterdikleri bilinmektedir [8, 27]. Bu deneysel çalışma kapsamında KPB'lerin su emme oranlarının geleneksel çimento kullanılarak hazırlanan diğer beton türlerine göre beklendiği şekilde daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5. Numunelerin ağırlıkça su emme oranı değerleri

Şekil 6'da tüm numunelere ait aşınma deneylerinden elde edilmiş olan hacim ve ağırlık kayıpları verilmiştir. PP ve KP'nin hacim kaybı değerleri sırasıyla 14,04 ve 13,16 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ olarak bulunmuştur. KPB'lerin ve aynı dayanım değerindeki PÇB'lerin aşınmayla hacim kaybı değeri sırasıyla 1,90 ve 9,82 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. PP ve KP numunelerinde elde edilen hacim kaybı değeri KPB kullanılmasıyla yaklaşık %86 oranında azalabileceği belirlenmiştir. Tüm beton gruplarına ait ağırlık kaybı değeri KPB'lerde en düşük olarak bulunmuş ve KP ve PP numunelerinde bu değerlerin en yüksek sonuçları verildiği belirlenmiştir.



Şekil 6. Böhme aşınma ve ağırlık kaybı değerleri

IV. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışma kapsamında geleneksel Portland çimentosu yerine son yıllarda kükürte alternatif kullanım alanı oluşturmak için betonda kullanılması amacıyla yaygınlaşan kükürt polimer betonlardan üretilen parke taşlarının yol kaplamasında kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla KPB ve aynı basınç dayanımına sahip PÇB numuneleri ve 2 farklı firmadan uygulamada kullanılan kilitli parke (KP) ile prizma parke (PP) hazırlanarak karşılaştırmalı olarak böhme aşınma dayanımı, ağırlık kaybı, basınç ve yarmada çekme dayanımı, su emme oranı ile görünür porozite deneyleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. KPB'nin geleneksel Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan beton parke taşlara nazaran daha az boşluklu olduğu ve buna bağlı olarak su emme oranının daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Yol kaplaması olarak kullanılan beton parke taşlarının önemli bir problemi olan durabiliteye bağlı bozunmaların geçirimsiz KPB parke taşı kullanımıyla azaltılabileceği ön görülmektedir.
2. PP ve KP numunelerden elde edilen hacim kaybı değerlerinin KPB kullanımı ile yaklaşık %86 oranında azaltılabileceği görülmüştür. Özellikle yol kaplamalarında kullanım yoğunluğuna bağlı olarak aşınma direnci yüksek parke taşı kullanımı ile yolların servis ömürlerinin uzatılabileceği ve bakım-onarım maliyetlerinin minimuma indirilebileceği düşünülmektedir.
3. Bu çalışma kapsamında hazırlanmış olan KPB, PÇB, PP ve KP numunelerinin ilgili standartça belirtilen sınır değerleri sağladığı belirlenmiştir.

Kükürt polimer beton ile hazırlanan parke taşlarının ilgili standart sınır değerlerini sağladığı ve yol kaplaması olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Yeni bir kullanım alanı oluşturulması ile petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürtün yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi sağlanabilir ve çimento kullanımı azaltılarak karbondioksit salınım miktarı da azaltılabilecektir. İlerleyen çalışmalarda kükürt polimer beton içinde farklı oranlarda atık malzeme kullanımının değerlendirilmesi ve parke taşı üretiminde üretim maliyetlerinin azaltılmasını hedefleyen çalışmaların gerçekleştirilmesi KPB parke taşlarının yaygın kullanımına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Yue L, Caiyun J, Yunping X (2006) The properties of Sulfur Rubber Concrete (SRC). J. Wuham Univ. Technol. Mater. Sci. 21:129-133. <https://doi.org/10.1007/BF02861490>
- [2] Öztürk O, Öner A (2022) Long-term Durability of Bitumen Modified Sulfur Polymer Concrete Under Freeze-Thaw Cycles. Int J Civ Eng 20:529-543. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00672-2>
- [3] Fediuk R, Amran Y, Mosaberpanah M, Danish A, El-Zedani M, S. Klyuev S, Vatin N (2020) Investigation Friction Loss of Concrete Pavement Surface with a New Method. Materials 13:4712. <https://doi.org/10.3390/ma13214712>
- [4] Bacon R, Davis H (1921) Recent Advances in the American Sulfur Industry. Chemical and Metallurgical Engineering 53:159-175.
- [5] Mohamed AMO, Gamal ME (2007) Sulfur Based Hazardous Waste Solidification. Environmental Geology 53:159-175. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0631-4>
- [6] Vlahovic M, Martinovic S, Boljanac T, Jovanic P, Volkov-Husovic T (2011) Durability of Sulfur Concrete in Various Aggressive Environments. Construction and Building Materials 25(10):3926-3934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024>
- [7] Shin M, Kim K, Gwon S, Cha S (2014) Durability of Sustainable Sulfur Concrete with Fly Ash and Recycled Aggregate Against Chemical and Weathering Environments. Construction and Building Materials 69:167-176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061>
- [8] Mmohamed AMO, Gamal ME (2009) Hydro-Mechanical Behavior of a Newly Developed Sulfur Polymer Concrete. Cement & Concrete Composites 31(3):186-194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.006>
- [9] Anyszka R, Bielinski D, Sicinski M, Imiela M, Szajerski P, Pawlica J, Walendziak R (2016) Sulfur Concrete-Promising Material for Space-Structures Building. European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental.
- [10] Hager I, Golonka A, Putanowicz R (2016) 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future for Sustainable Construction. Procedia Engineering 151:292-299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.35>

- [11] Yang C, Lv X, Tian X, Wang Y, Komarneni S (2014) An Investigation on the Use of Electrolytic Manganese Residue as Filler in Sulfur Concrete. *Construction and Building Materials* 73:305-310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.046>
- [12] Contreras M, Gazquez M, Garcia-Diaz I, Alguacil F, Lopez F, Bolivar J (2013) Volarization of Waste Ilmenite Mud in the Manufacture of Sulphur Polymer Cement. *Journal of Environmental Management* 128: 625-630. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.015>
- [13] Al-Otaibi S, Al-Aibani A, Al-Bahar S, Abdulsalam M, Al-Fadala S (2019) Potential for Producing Concrete Blocks Using Sulphur Polymeric Concrete in Kuwait. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 31(4): 327-331. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.02.004>
- [14] Ciak N, Harasymiuk J (2013) Sulphur Concrete's Technology and Its Application to the Building Industry. *Technical Sciences* 16(4):323-331.
- [15] McBee W, Sullivan T (1983) *Industrial Evaluation of Sulfur Concrete in Corrosive Environments*. U.S. Bureau of Mines.
- [16] Mohamed A, El Gamal M (2010) *Sulfur Concrete for the Construction Industry*. J. Ross Publishing, Florida.
- [17] Al-Ansary M, Masad E, Stricklan D (2010) Innovative Solutions for Sulphur: Initial Field Monitoring and Performance of Shell Thiopave Trial Road in Qatar. 2nd Annual Gas Processing Symposium, Doha, Qatar, January 10-14.
- [18] Al-Ansary M (2010) Innovative Solutions for Sulphur in Qatar. The Sulphur Institute's (TSI) Sulphur World Symposium, Doha, Qatar, April 12-15.
- [19] Gulzar M, Rahim A, Ali B, Khan A (2021) An investigation on recycling potential of sulfur concrete. *Journal of Building Engineering* 38. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102175>
- [20] Tekmen T (2006) Kireçtaşlarından Üretilen Kilitli Beton Parke Bloklarının Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- [21] Karpuz O, Akpınar M, Aslan H, Çelik M, Çiçek E (2022) Investigation Friction Loss of Concrete Pavement Surface with a New Method. *J. Innovative Eng. Nat. Sci.* 2:66-75. <http://dx.doi.org/10.29228/JIENS.62559>
- [22] TS EN 932-1; Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler-Kısım 1 Numune Alma Metotları (1997) Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [23] TS EN 933-1; Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini-Elleme Yöntemi (2012) Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [24] TS 2824 EN 1338; Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları Gerekli Şartlar Ve Deney Metotları (2005) Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [25] ASTM C-39; Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2018) American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- [26] Vlahovic M, Savic M, Martinovic S, Boljanac T, Volkov-Husovic T (2012) Use of Image Analysis for Durability Testing of Sulfur Concrete and Portland Cement Concrete. *Materials and Design* 34: 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.026>
- [27] Lee S, Hong K, Park J, Ko J (2014) Influence of Aggregate Coated with Modified Sulfur on the Properties of Cement Concrete. *Materials* 7: 4739-4754. <https://doi.org/10.3390/ma7064739>