

Kükürt Polimer Betonların Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü İlişkisinin Yönetmelikler Açısından Karşılaştırılması

Onur ÖZTÜRK¹, Adnan ÖNER², Murat KARADENİZ³

^{1,2} Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli, Türkiye

³ Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 69000, Bayburt, Türkiye

(Alınış/Received: 18.01.2023, Kabul/Accepted: 24.10.2023, Online Yayınlanma/ Published Online: 25.12.2023)

Anahtar Kelimeler

Kükürt,
Kükürt Polimer Beton,
Elastisite Modülü,
Basınç Dayanımı

Öz: Üstün mekanik ve durabilite özellikleri ile kükürt polimer betonlar (KPB) geleneksel Portland çimento betonlarına (PÇB) alternatif yapı malzemesi olarak son yıllarda ön plana çıkmıştır. Betonun önemli bir tasarım parametresi olan elastisite modülü ile ilgili araştırmaların KPB'ler açısından literatürde yetersiz olduğu ve standartlarda önerilen tahmin modellerinde halen göz önünde bulundurulmadığı görülmektedir. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında, KPB'lerin basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin uluslararası standartlarca önerilmiş olan analitik modeller ve geleneksel PÇB'ler ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda KPB'lerin elastisite modüllerinin, benzer basınç dayanımı değerlerine sahip PÇB'lere göre daha düşük değerlerde kaldığı belirlenmiştir. PÇB'ler için standartlarda önerilmiş olan analitik modellerin KPB'lerin elastisite modülleri tahmininde ACI 363R-92 ve NS 3473 standartları haricinde yaklaşık değerler elde edilemediği görülmüştür. Deneysel çalışmadaki veriler kullanılarak bu çalışma kapsamında yeni bir analitik model önerilmiştir. Önerilen analitik model, yakın sonuç veren standartlardaki modeller ile istatistiksel olarak karşılaştırmalı incelenmiş ve önerilen modelin deneysel değerlere en yakın sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Comparison of Design Guidelines for Relationship of Sulfur Polymer Concrete Compressive Strength and Modulus of Elasticity

Keywords

Sulfur,
Sulfur Polymer Concrete,
Modulus of Elasticity,
Compressive Strength

Abstract: Sulfur polymer concrete (SPC) with its superior mechanical and durability properties has come to the fore in recent years as an alternative construction material to traditional Portland cement concrete (PCC). It is seen that the studies on the modulus of elasticity, which is an important design parameter of concrete, are insufficient in the literature for SPC and are still not considered in the prediction models suggested in the standards. This study aims to examine the compressive strength-modulus of elasticity relationship of SPC comparatively with analytical models proposed by international standards and traditional PPC. As a result of the experimental study, it was determined that the modulus of elasticity of SPC remained at lower values than PCC with similar compressive strength values. It was observed that the analytical models proposed in the standards for PCC could not obtain approximate values for the estimation of the modulus of elasticity of SPC, except for the ACI 363R-92 and NS 3473 standards. A new analytical model was proposed using the experimental data within the scope of this study. The proposed analytical model was statistically compared with the models in the standards that gave close results, and it was determined that the proposed model gave the closest results to the experimental values.

1. Giriş

Geleneksel Portland çimento betonu, tüketimi dünya nüfusu ve gelirlerdeki artış devam ettikçe katlanarak artan ve dünyada en yaygın şekilde kullanılan insan yapımı yapı malzemesidir [1]. PÇB, içerisinde bağlayıcı olarak bulunan çimentonun imalatı sırasında açığa çıkan yüksek CO₂ emisyonu nedeniyle çevre dostu bir yapı malzemesi olarak görülmemektedir [2]. Çimento endüstrisi küresel ısınma emisyonlarının %82'sinden sorumludur [3]. Bunun yanı sıra çimento endüstrisi ürettiği yüksek miktarda toz ve üretim için tükettiği fosil yakıtlar nedeniyle birçok çevresel sorunu da beraberinde getirmektedir [4]. Yakın gelecekte PÇB tüketimi oranı azaltılmazsa, çimento sektörü küresel ısınma sorununun büyük bir parçası olmaya devam edecektir.

Çimento tüketiminin azaltılması için literatürde birçok yöntem önerilirken beton içinde kullanılan çimento miktarının azaltılması ve alternatif yapı malzemesi çalışmaları en yaygın olarak denenilen yöntemler olarak dikkat çekmektedir[5]. Kükürt her ne kadar genellikle tarım, ilaç ve kauçuk ürünlerin imalatında kullanılsa da son yıllarda inşaat mühendisliğinde su+çimento'ya alternatif bağlayıcı malzeme olarak tercih edilmesi, çimento üretiminde çevreye verilen zararların azaltılmasını sağlayan alternatif bir yapı malzemesi olmasını sağlamıştır. Kükürt petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edildiği için çimento gibi bir üretim prosesi gerektirmemektedir. Çimentoya alternatif bir yapı malzemesi olarak çimento üretiminin ve kullanımının azaltılmasını sağlayarak bu prosesin küresel ısınma üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaktadır.

Son yıllarda özellikle fosil yakıt kullanımındaki artış, petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürtün rezervlerindeki artışı da beraberinde getirmiştir [6]. Bu artan kükürt rezervlerinin değerlendirilmesi amacıyla özellikle petrol üreticilerinin desteğiyle kükürte yeni kullanım alanlarının oluşturulması hedeflenmiştir. Kükürt, 1921 yılında ilk defa inşaat mühendisliği uygulamalarında bağlayıcı olarak kullanılması denenmiştir [7]. 1921-1960 yılları arasında devam eden çalışmaların amacı kükürtün PÇB'ye alternatif olarak inşaat uygulamalarında bağlayıcı olarak kullanılabilmesinin gösterilmesiydi. Bağlayıcı olarak saf kükürtün kullanıldığı betonlarda kükürtün soğuması ile betonun içyapısında gerçekleşen faz dönüşümü sonucunda kısa sürede parçalanma ve göçmelerin meydana geldiği belirlenmiştir[8]. Dayanım ve dayanıklılık kaybına yol açan bu faz dönüşümünün engellenmesi amacıyla kimyasal veya fiziksel olarak kükürt kristalizasyonu kontrol edilerek saf kükürtün modifiye edilmesi gerekliliği anlaşılmıştır [9]. Kükürt modifikasyonunda kristalizasyonun kimyasal olarak kontrol edilmesinde disiklopentadien (DCPD) ve DCPD, siklopentadien ve dipenten kombinasyonları yaygın olarak kullanılırken

fiziksel kontrolde ise olefin hidrokarbon polimerleri ve uçucu kül gibi fiziksel stabilizatör kullanılmaktadır. Bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan olefin hidrokarbon polimerleri ise escopol ve bitüm olarak özetlenebilmektedir [10]. Genel olarak, saf kükürdü modifiye etmek için kimyasal katkı maddeleri eklenir, bunların neredeyse tamamı polimerik polisülfid başlığı altına girer veya alternatif olarak, karışım anında polimerik polisülfid oluşumu sağlamak için saf kükürt ile reaksiyona girebilen maddelerdir. Bu nedenle belirtilen kimyasal katkılar ile reaksiyona giren saf kükürt polimerize kükürt (kükürt polimer) veya modifiye kükürt olarak tanımlanmaktadır. Saf kükürtün soğuma sırasında meydana gelen hacimsel değişikliklerin azaltılması ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi için kimyasal katkı ile modifiye edilen kükürt betonlar da "kükürt polimer beton" (KPB) olarak isimlendirilmektedir.

Deneysel çalışmalar modifiye edilmiş kükürt kullanılarak hazırlanan KPB'lerin; hızlı priz alma, 1 saat içinde hedef basınç dayanımının %78'ine ulaşma, korozif ortamlarda yüksek dirence sahip olma, düşük geçirimsizlik özelliği ve geri dönüşüm gibi PÇB'lere oranla birçok avantaja sahip olduğunu göstermiştir [2,11]. Aynı zamanda KPB, hızlı priz alma ve mukavemet kazanma özelliği dikkate alınarak 3D yazıcı teknolojilerinde de kullanım alanı bulmuştur [12]. KPB'lerin yüksek aşınma dirençleri nedeniyle beton kaplama blokları olarak kullanılabilirliği konusunda da deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13]. Ayrıca literatürde uçucu kül ve geri dönüştürülmüş agrega, elektrolitik mangan kalıntısı, atık ilmenit çamuru gibi atık maddelerin değerlendirilmesine yönelik deneysel çalışmalar da bulunmaktadır [14,15,16].

KPB'ler göstermiş oldukları üstün dayanım ve durabilite özellikleri nedeniyle son yıllarda gerçekleştirilen birçok deneysel çalışmaya konu olmuştur. Yapı malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra aynı zamanda zemin iyileştirme yöntemlerinde çimentonun yerini alarak geoteknik alanında kendisine kullanım alanı bulmuştur [17,18]. İnşaat mühendisliğinde alternatif yapı malzemesi olarak görülen kükürt bağlayıcılar ile hazırlanan betonların, önemli bir tasarım parametresi olmasına rağmen elastisite modüllerinin belirlenmesi ile ilgili literatürde detaylı bir çalışma yer almamaktadır. Beton, betonarme ve öngerilmeli yapıların deformasyon hesaplarında kullanılmasından dolayı betonların elastisite modüllerinin tayin edilmesi büyük önem taşır. PÇB'lerin elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki bilinmektedir ve bu konu ile ilgili birçok analitik model literatürde önerilmiştir [19]. Bu analitik modeller aynı zamanda çeşitli uluslararası standartlarda da yer almıştır ve malzemenin tahrip edilmeden yaklaşık olarak elastisite modülünün bulunmasını sağlamaktadırlar. Deneysel çalışmalar göz önünde bulundurularak analitik olarak elde edilmiş olan tüm bu standartlarda

yer alan modeller geleneksel PÇB'lere ait veriler kullanılarak hazırlanmıştır ve kükürt bağlayıcı betonlar yaygın kullanım alanı bulmasına ve akademik yönden çok sayıda araştırmaya konu olmasına rağmen halen tasarım standartlarının içinde kendilerine yer bulamamıştır. Kükürt betonların analitik olarak hesaplanan elastisite modülü tahmin modeli ile ilgili literatürde yer alan çalışmaların yetersiz olduğu görülmektedir.

Son yıllarda inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılması, önemli bir tasarım parametresi olan elastisite modülü basınç dayanımı ilişkisi ile ilgili konularda literatürde eksiklikler olması ve standartlarda verilmiş olan elastisitemodülü tahmin modellerinde kükürt bağlayıcı betonların göz önüne alınmamış olması nedeniyle bu deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış olan KPB'lerin basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkileri değerlendirilmiş ve benzer basınç dayanımı değerine sahip PÇB'ler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen elastisite modülü değerleri kullanılarak ve literatürde yer alan analitik modeller de göz önünde bulundurularak çalışma kapsamında yeni bir tahmin modeli önerilmiştir. Önerilen bu model uluslararası standartlarda önerilmiş olan modeller ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonunda elde edilen analitik modelin sadece PÇB'lerin değil aynı zamanda KPB'lerin de elastisite modülü değerlerinin tahribatsız olarak analitik yöntemler ile tahmin edilebilmesi imkânını sağlaması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan malzemeler

Bu çalışmada Tüpraş-İzmit rafinerisinde petrol işleme yöntemi olan Claus prosesi sonucunda açığa çıkan saf kükürt ve aynı rafineriden temin edilen özgül ağırlığı 1.034 g/cm³, viskozitesi 416 cSt olan 50/70 penetasyonlu bitüm kullanılmıştır. İri taneli olarak temin edilen kükürtün saflığı %99.8'dir. Kükürde ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kükürtün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Test Metodu
Görünüm		Katı parçacıklı	Gözle muayene
Koku		Kokusuz	
Erime/Donma Noktası	°C	119	ASTM D-97
Kaynama Noktası Başlangıcı	°C	445	ASTM D-86
Bağlı Yoğunluk (15°C'de)	kg/L	2.1	ASTM D1298
Alev Alma Sıcaklığı	°C	206	ASTM D-93

Geleneksel Portland çimentosu betonlarında bağlayıcı olarak CEM I 42.5 tip çimento kullanılmıştır. Filler

olarak Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiş olan F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül ve çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 2'de, mekanik ve fiziksel özellikleri ise Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 2. Çimento ve uçucu külün kimyasal bileşimi

	Çimento	Uçucu Kül
SiO ₂	22.10	57.32
Al ₂ O ₃	4.37	25.21
Fe ₂ O ₃	3.30	6.86
CaO	65.63	1.47
MgO	1.20	1.86
SO ₃	2.62	0.47
Na ₂ O	0.28	0.41
K ₂ O	0.46	4.08
Cl ⁻	0.048	0.01
KK*	2.64	1.19
ÇK**	0.68	-

*KK: Kızdırma Kaybı
**ÇK: Çözünmeyen Kalıntı

Tablo 3. Çimento ve uçucu külün mekanik ve fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikler		
Özellikler	Çimento	Uçucu Kül
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.14	2.29
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3420	2765
Hacim Sabitliği (mm)	1.05	1.00
Priz Başlangıcı (dak.)	179	-
Priz Sonu (dak.)	200	-
Mekanik Özellikler		
Basınç Day. (MPa)(7 gün)	47.5	-
Basınç Day. (MPa)(28gün)	58.1	-

Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan hem KPB hem de PÇB'lerde aynı tip agrega kullanılmıştır. Betonlarda özgül ağırlığı 2.68 g/cm³ ve incelik modülü 4.88 olan kırmataş ile özgül ağırlığı 2.60 g/cm³ ve incelik modülü 2.28 olan doğal kum kullanılmıştır.

2.2. Numunelerin hazırlanması

Kükürt polimer beton karışımlarında kullanmak için öncelikle saf kükürt kimyasal katkı olarak sadece bitüm kullanılarak modifiye edilmiştir. Literatürde açıklanmış olan yöntem uygun olarak saf kükürte ağırlıkça % 2.5 oranında bitüm katılarak minimum 20 dk boyunca sabit 135±5°C sıcaklıkta yüksek hızda karışım homojen hale gelene kadar karıştırma yapılmış ve sonra oda sıcaklığına gelene kadar soğutulmuştur [10,11,20]. Elde edilen modifiye kükürt (MK), beton karışımı sırasında erime süresinin çok değişken olmaması için belirli inceliğe gelene kadar öğütülmüştür. Çalışmada kullanılan MK Şekil 1'de gösterilmiştir.

MK hazırlanmasında ve kükürt bağlayıcı betonların dökümlerinde sıcaklık çok önemli bir faktördür. Bundan dolayı karışım süresince sıcaklık 135±5°C değerinde sabit tutulması için Şekil 2'de gösterilen sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 1. Öğütülmüş modifiye kükürt



Şekil 2. Sıcaklık kontrollü mekanik karıştırıcı

Ani priz ve soğuk derz oluşumunun engellenmesi amacıyla 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 karıştırıcı 135±5°C değerine sabitlendikten sonra saf kükürt karıştırıcıya konularak sıvı faza gelmesi sağlanmıştır. Saf kükürt tamamen eriyip sıvılaştıktan sonra içerisine etüvde bekletilmiş olan uçucu kül ilave edilerek 10 dakika düşük hızda, 10 dakika yüksek hızda olmak üzere toplam 20 dakika karıştırılarak karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Uçucu kül ve saf kükürt arasındaki reaksiyonların tam olarak sağlandığından ve karışımın homojen hale geldiğinden emin olduktan sonra bu karışıma modifiye kükürt ilave edilmiştir. MK, beton karışımına ilave edildikten sonra 10 dk süre ile karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra saf kükürt, modifiye kükürt ve uçucu külden oluşan karışımın içerisine etüvde bekletilmiş olan doğal kum ve kırmataş ilave edilerek karışımın homojen hale geldiğine emin olana kadar minimum 20 dakika süre ile karıştırılması sağlanmıştır. Beton karışımı etüvde ısıtılan 100x200 mm'lik silindir metal kalıplar içerisine

doldurulmuştur. Metal kalıplara yerleştirilen KPB karışımı, plastik tokmak ve sıcak demir çubuk yardımıyla şişlenerek yerleştirme işlemleri tamamlanmıştır. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra tüm numuneler 7-13°C/dk hızda oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Dökümleri tamamlanmış ve kalıptan çıkarılmış olan silindir numune Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. KPB numunesi

Elastisite modülü üzerinde beton basınç dayanımı önemli bir faktördür, bu nedenle KPB ile PÇB deney sonuçlarının karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi için her iki betonun basınç dayanımının benzer olması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada öncelikle KPB numuneleri hazırlanmış ve bu numunelerin ortalama basınç dayanımı PÇB'lerin hedef basınç dayanımı olarak seçilmiştir. PÇB'ler için birçok farklı w/c oranına ve dozaja sahip alternatif deneme dökümleri gerçekleştirilerek KPB basınç dayanımına en yakın değeri veren deneme karışımı bu çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerin 1 m³ için karışım miktarları Tablo 4'te ve KPB'lerin karışımında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzdeleri ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. 1 m³ beton için gerçek karışım miktarları

Malzeme	KPB	PÇB
Saf Kükürt (kg/m ³)	776.4	-
MK (kg/m ³)	24.0	-
W/C	-	0.50
Çimento (kg/m ³)	-	403.9
Su (kg/m ³)	-	201.9
Doğal Kum (kg/m ³)	343.1	680.2
Kırmataş (kg/m ³)	343.1	1051.7
Uçucu Kül (kg/m ³)	800.5	-
Kimyasal katkı (%)	-	1.3

Tablo 5. KPB ağırlıkça karışım yüzdesi

	Bağlayıcı (%)	Uçucu Kül (%)	Agrega (%)	Doğal Kum	Kırmataş
Saf Kükürt					
KPB	33.95	1.05	35.00	15.00	15.00

Deneysel çalışma kapsamında 6' şar adet KPB ve PÇB numunesi olmak üzere toplamda 12 adet silindir numune hazırlanmıştır.

KPB'ler kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında kendi kendine soğumaya bırakılmış ve deney süresine kadar aynı ortamda kürlenmiştir. PÇB'ler ise kalıptan çıkarıldıktan sonra su havuzunda kürlenmiştir. PÇB numuneler deneylerden önce havuzdan çıkarılarak sabit ağırlığa gelinceye kadar laboratuvar ortamında bekletilmiş ve 28 gün sonunda tüm numuneler deneye tabi tutulmuştur.

2.3. Deney prosedürü

KPB ve PÇB'lerden hazırlanan 100 mm çaplı 200 mm yüksekliğindeki numuneler üzerinde statik elastisite modülü değerinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Betonların şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesi amacıyla, silindir numuneler üzerine şekil değiştirme ölçümlerinin alındığı, deplasman ölçerlerin bağlı olduğu bir kafes kullanılmıştır. Kafes üzerinde düşey deformasyonların okunması için 2 adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir. Düşey yüklemelerin oluşturulduğu hidrolik pres içerisine yerleştirilen yük hücresi kullanılarak silindir numune üzerinde meydana gelen gerilme büyüklükleri belirlenmiştir. Bilgisayara bağlı olan 8 kanallı data toplama sistemi kullanılarak yük hücresinden gelen her yük verisine karşılık alınan düşey deplasman değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4'te gösterilen deney düzeneğinden elde edilen veriler kullanılarak silindir numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiş ve bu grafikler kullanılarak elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Deneyler ASTM C-469 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [21].



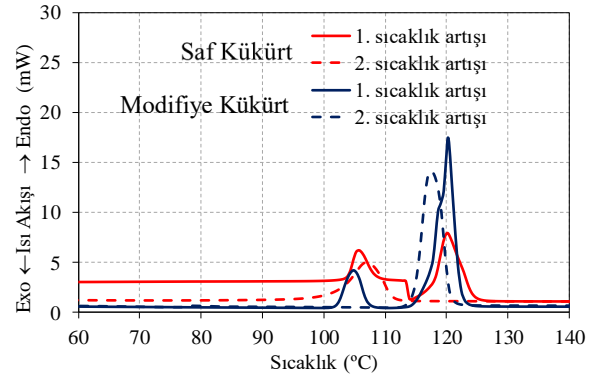
Şekil 4. Statik elastisite modülü deney düzeneği

3. Bulgular

3.1. MK deney sonuçları

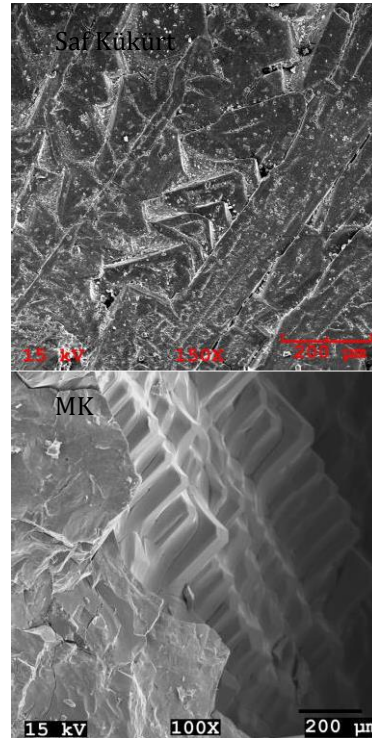
Saf kükürte bitüm ilave edilerek gerçekleştirilen modifikasyon uygulamasının gerçekleşip gerçekleşmediğinin belirlenmesi amacıyla saf kükürt ve MK numuneleri üzerinde karşılaştırmalı olarak DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri gerçekleştirilmiştir. DSC analizinde, numuneler öncelikle oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtılmış (1. Sıcaklık artışı) daha sonra

bu sıcaklık seviyesinden oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra tekrar ısı yüklemesi uygulanarak (2. sıcaklık artışı) oda sıcaklığından 150°C'ye kadar ısıtılarak üç farklı sıcaklık rejimi uygulanmıştır. Tüm ısıl hareketlilik adımları 5°C/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Saf ve modifiye kükürt numunelerine ait DSC diyagramları Şekil 5'te verilmiştir. Saf kükürt numunesinin DSC analizleri incelendiğinde, birinci sıcaklık artışından sonraki soğuma periyodunda S_{α} kristallerinin meydana geldiği gözlenirken, MK numunesinde ise S_{β} kristalleşmesinin meydana geldiği gözlenmiştir. Karışıma bitüm ilavesinin, kükürt kristalleşmesini baskıladığı ve kristallerin büyümesini engellediği için soğutma periyodunda S_{β} kristallerinin S_{α} kristallerine dönüşmesini engellediği belirlenmiştir.



Şekil 5. Saf kükürt ve MK'ya ait DSC diyagramları

Saf kükürt ve MK numunelerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Saf kükürt ve MK'ya ait SEM görüntüleri

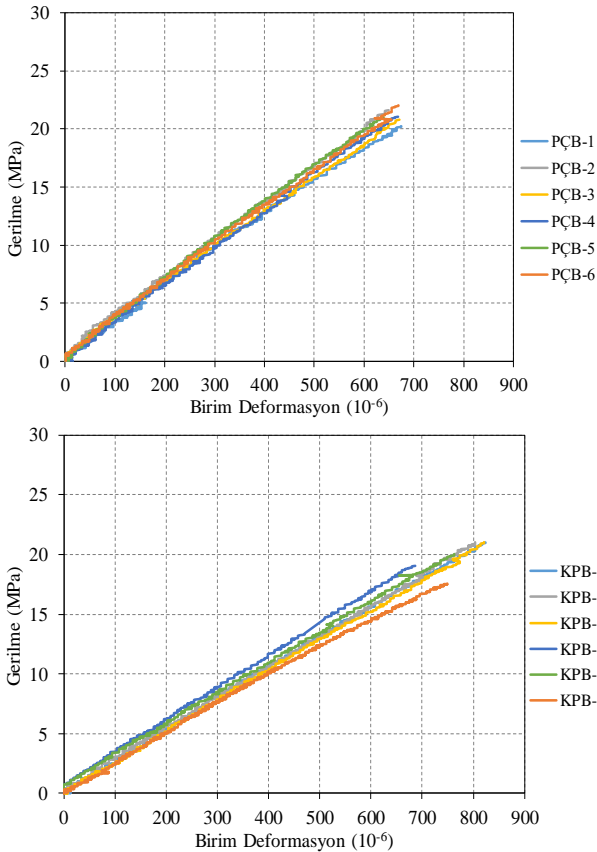
Saf kükürtün kristallenme sonrasında ortorombik

kükürt morfolojisine sahip geniş ve yoğun S_{α} kristal yapısında olduğu görülmüştür. Saf kükürt içerisine bitüm ilavesi ile birlikte kristal büyümesi bitüm tarafından sınırlandırılarak kontrol altına alınmaktadır. Bunun sonucu olarak, plakalı yapı görünümüne sahip monoklinik faza dönüşümünü engellenmektedir. Saf kükürde ait yoğun ve geniş ortorombik kristal yapının, bitüm ilavesi ile birlikte plakalı yapıya sahip monoklinik kristal formunda sabit kaldığı ve S_{β} - S_{α} dönüşümünün gerçekleşmediği belirlenmiştir.

DSC ve SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, MK monoklinik kristal formunda sabit kaldığı ve S_{β} - S_{α} dönüşümünün gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Saf kükürte %2.5 oranında bitüm ilave edilerek yapılan modifikasyonun başarılı olduğu belirlenmiştir.

3.2. Statik elastisite modülü deney sonuçları

KPB ve PÇB numunelerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Statik elastisite modülü hesaplarında basınç dayanımının %40'ına karşılık gelen gerilme ve deformasyon değerleri kullanılarak elastisite modülü değeri belirlendiği için bu grafiklerde basınç dayanımının %40'ına kadar olan değişimler verilmiştir. Tüm deneyler PÇB'lerde 28 gün sonunda

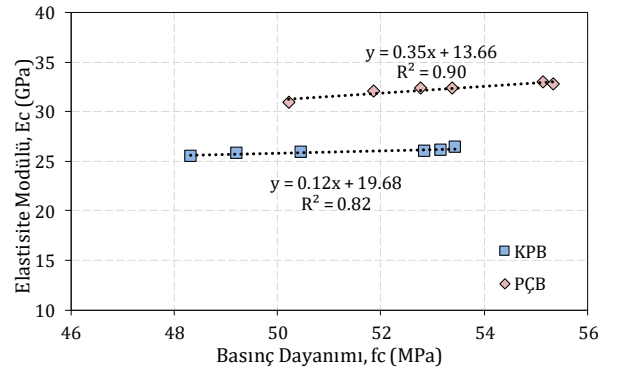
gerçekleştirilirken KPB'ler 28 günlük nihai basınç dayanımının %94'üne 7 gün sonunda ulaştığı bilindiğinden hem 7 hem de 28 günlük deney sonuçları kullanılmıştır [20].

Yakın basınç dayanımı değerlerine sahip olmasına karşın KPB'lerin PÇB'lere oranla daha gevrek davranış gösterdiği ve deneylerin ani kırılma ile sonlandığı gözlenmiştir. Benzer gerilme değerleri altında KPB numunelerinin birim deformasyon değerleri, PÇB numunelerinin birim deformasyon değerinden daha büyük seviyelerde kaldığı görülmüş ve deneylerden elde edilen bu sonuçların literatürde bulunan çalışmalar ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir [14]. Ayrıca PÇB'lerin KPB'lerden daha yüksek rijitliğe sahip olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 6'da özetlenmiştir. Basınç dayanımı değişiminin elastisite modülü üzerindeki etkisinin belirlenmesi için Şekil 8'deki grafik hazırlanmıştır. Geleneksel Portland çimento betonlarında elde edilen maksimum elastisite modülü değeri 33.04 GPa iken bu beton türünde elde edilen ortalama değer 32.29 GPa olarak bulunmuştur. Kükürt bağlayıcılı betonlarda ise maksimum ve ortalama elastisite modülü değerleri sırasıyla 26.4 ve 25.98 GPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Deney sonuçları

	Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Elastisite Modülü, E_c (MPa)
KPB-1	52.84	26016
KPB-2	53.15	26132
KPB-3	53.44	26431
KPB-4	50.46	25913
KPB-5	49.20	25829
KPB-6	48.32	25538
PÇB-1	50.22	30987
PÇB-2	52.77	32414
PÇB-3	51.86	32080
PÇB-4	53.38	32400
PÇB-5	55.14	33044
PÇB-6	55.33	32818



Şekil 8. Elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

Kükürt bağlayıcılı betonlarda, bağlayıcı olarak su ve çimento kullanılan geleneksel betonlarda görüldüğü

gibi, basınç dayanımındaki artışın elastisite modülünü modüllerinin, benzer basınç dayanımı değerlerine sahip PÇB'lere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

3.3. Analitik modeller

Betonun heterojen yapıda olması göz önünde bulundurulduğunda elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişki kompleks olduğu açıkça görülmekte olmasına karşın beton basınç dayanımının elastisite modülü üzerindeki etkisi oldukça önemli bir parametre olarak görülmektedir. Basınç dayanımı artışının elastisite modülünün artmasına neden olduğu ancak bu artışın lineer olmadığı ve basınç dayanımı büyüklüğünün üstel bir fonksiyonu olarak değişim gösterdiği bilinmektedir [22]. Özellikle geleneksel Portland çimentosu betonları üzerinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar sonucunda basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin tanımlandığı birçok analitik model önerilmiştir [23].

Bu çalışma kapsamında 8 farklı uluslararası standartta tanımlanmış olan geleneksel Portland çimentosunun basınç dayanımına bağlı olarak elastisite modülü değerinin hesaplanmasını sağlayan analitik model incelenmiştir. Hem PÇB hem de KPB'lerin elastisite modülü tahmini için kullanılan bu analitik modeller Tablo 7'de verilmiştir. Bu modellerin PÇB'ler için önerildiği göz önünde bulundurulduğunda uluslararası standartlarda yer almayan KPB'lerin elastisite modülü tahmini için kullanılmalarının uygunluğu araştırılmıştır.

Tablo 7. Standartlarda önerilen analitik modeller [24,25,26,27,28,29,30,31]

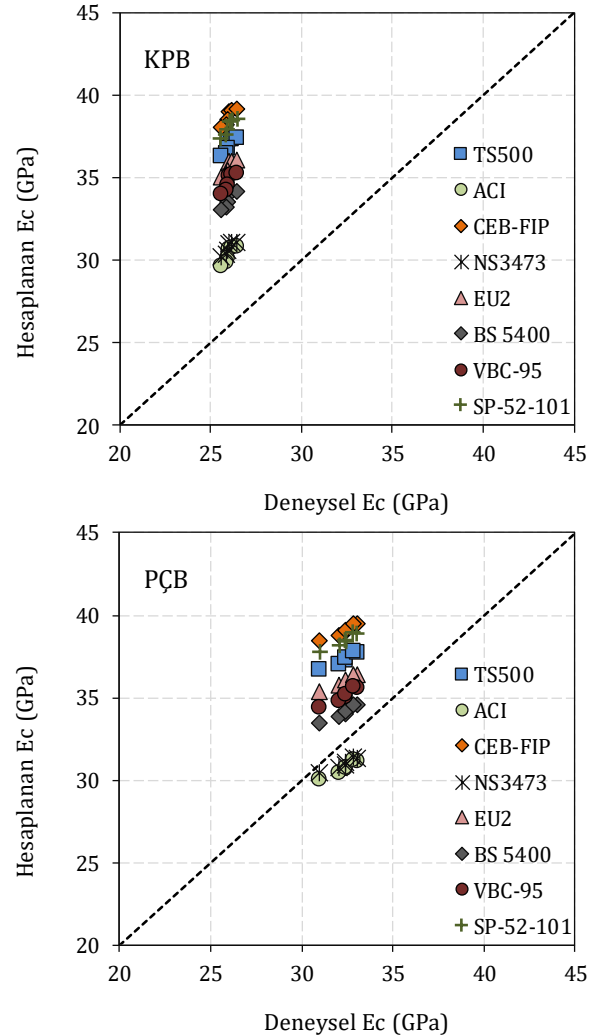
Standart	Analitik Model (MPa)
TS 500 (2000)	$E_c = 3520 \sqrt{f_c} + 14000$
ACI 363R-92	$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6890$
CEB-FIP 1993	$E_c = 10000 \sqrt[3]{f_c} + 8$
NS 3473	$E_c = 9500 (f_c)^{0.3}$
EN 1992-1-1	$E_c = 22000 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3}$
BS 5400-4 (1990)	$E_c = 8647.5 (f_c)^{0.348}$
VBC-95	$E_c = 22250 + 250 (f_c)$
SP 52-101 (2003)	$E_c = 11.652 \ln(f_c) - 7.4713$

Deneysel çalışmada kullanılan sıcaklık kontrollü karıştırıcı kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda KPB dökümlerinde D:100/H:200 mm silindir kalıp kullanılmıştır. Boyut etkisi olmaması için PÇB'ler de aynı ebatta kalıp kullanılarak hazırlanmıştır. Standartlarda önerilmiş olan analitik modellerde tanımlanmış olan basınç dayanımı değeri standart silindir (D:150 mm, H:300 mm) numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri olduğu için deneysel çalışmada kullanılan D: 100 mm, H: 200 mm PÇB silindir numunelere ait değerler eşdeğer standart silindir değerlerine dönüştürülmüştür. 100/200 mm silindir numune basınç dayanımı değerinin (f_{c100}) 150/300 mm standart silindir numune basınç

dayanımı (f_{c150}) değerine dönüştürülmesinde literatürde Yazıcı ve Sezer tarafından önerilmiş olan Denklem (1) kullanılmıştır [32]. Denklem (1) PÇB'ler için önerilmiş olmasına karşın KPB betonlarda boyut etkisinin basınç dayanımı değişimi üzerindeki etkisini gösteren deneysel bir çalışma literatürde yer almadığından ve çalışmada PÇB'ler için önerilmiş olan standart modellerin her iki beton için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlandığından KPB'lerin boyuta bağlı basınç dayanımı değişimlerinde de Denklem (1) kullanılmıştır.

$$f_{c150} = 0.9728 f_{c100} - 0.1082 \quad (1)$$

Bu deneysel çalışma kapsamında PÇB ve KPB'ler için elde edilen basınç dayanımı-elastisite modülü sonuçları standartlarca önerilen analitik modeller kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. KPB ve PÇB için deneysel-hesaplanan elastisite modülü karşılaştırması

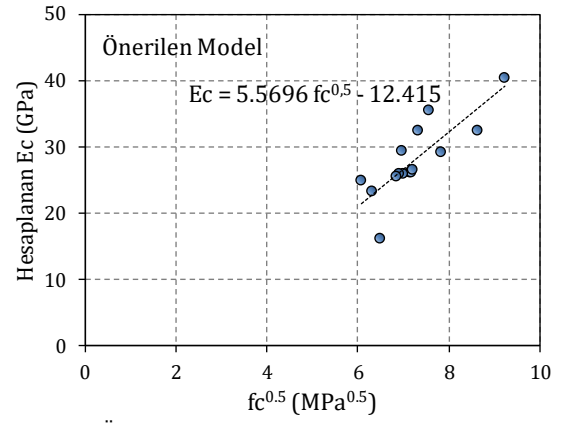
KPB ve PÇB'lere ait grafikler göz önüne alındığında; uluslararası standartlarca önerilmiş olan analitik modellerin, PÇB'lerde deneysel sonuçlara daha yakın

sonuçlar verirken, KPB'lerde bu modellerin yüksek sonuçlar verdiği ve deneysel sonuçları tam olarak temsil edemediği anlaşılmıştır. PÇB'ler için önerilmiş olan analitik modellerde kullanılan parametrik değerlerin, KPB'lerin PÇB'lere oranla daha fazla şekil değiştirme özelliğinin olması nedeniyle kükürt bağlayıcılı betonların elastisite modülü tahminlerinde kullanılmasının uygun olmadığı açıkça görülmektedir.

Yapılmış olan deneysel çalışmada elde edilen KPB'lere ait elastisite modülü değerlerine en yakın sonucu sırasıyla ACI363R-92 ve NS 3473 standartlarına önerilen analitik modeller kullanılarak yapılan tahminlerin verdiği belirlenmiştir. En yakın tahmin sonuçlarını veren ACI363R-92 standardına ait modelin parametrik katsayılarının, deney sonuçları ve literatürden elde edilen veriler birlikte kullanılarak KPB betonlar için yeniden düzenlenmesi çalışmanın bu bölümünde amaçlanmıştır. Kükürt bağlayıcılı betonların nispeten yeni bir konu olması ve üzerinde son yıllarda çalışmaya başlanması nedeniyle literatürde bu betonlara ait çok fazla veri bulunmamaktadır. Bu nedenle sadece Hammons vd., Shin vd., ve Ghasemi vd. tarafından yapılmış olan kükürt bağlayıcı betonlar ile ilgili çalışmalardan elde edilen elastisite modülü değerleri bu çalışmada istatistiki değerlendirme yapmak amacıyla kullanılabilmiştir. [2,14,33]. Literatürden veriler alınırken yapılmış olan deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin silindir, 100 mm çapında ve H/D oranı 2 olmasına dikkat edilmiştir. Literatürden elde edilen basınç dayanımı değerleri boyut etkisinin tüm çalışmada sabit olması açısından Denklem (1) ile standart silindir dönüşümü gerçekleştirildikten sonra analitik model oluşturulmuştur. 3 farklı çalışmadan toplam 9 adet veri elde edilmiş ve yapılmış olan deneysel çalışmaya ait 6 KPB verisiyle birleştirilerek toplam 15 adet numuneye ait istatistiki değerlendirme yapılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen basınç dayanımı değerleri literatürden elde farklı aralıklardaki değerler ile desteklenerek daha geniş bir dayanım aralığında basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi değerlendirmesi sağlanmıştır. Elde edilen tüm veriler kullanılarak oluşturulan basınç dayanımının karekökünün deneysel olarak elde edilen elastisite modülü ile ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir.

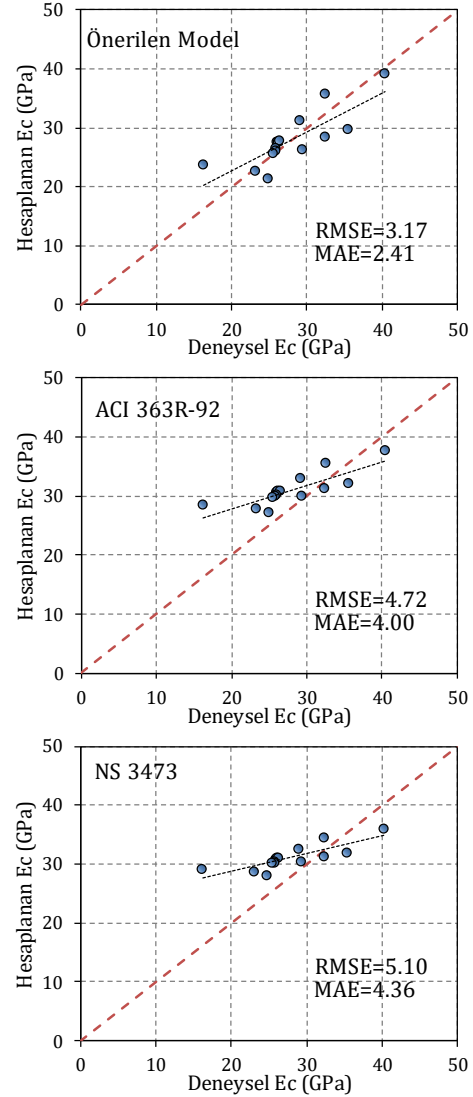
Kullanılan tahmin modelleri içinde gerçek değerlere en yakın sonuç elde edilen ACI standardına ait basınç dayanımı karekökünün elastisite modülü ile lineer ilişkisi değerlendirilerek belirlenmiş olan yeni parametrik katsayılar Denklem 2'de verilmiştir. Burada "E_c" elastisite modülünü, "f_c" ise 28 günlük standart silindir bas dayanımını temsil etmektedir.

$$E_c = 5.5696 \sqrt{f_c} - 12.415 \quad (2)$$



Şekil 10. Önerilen analitik model

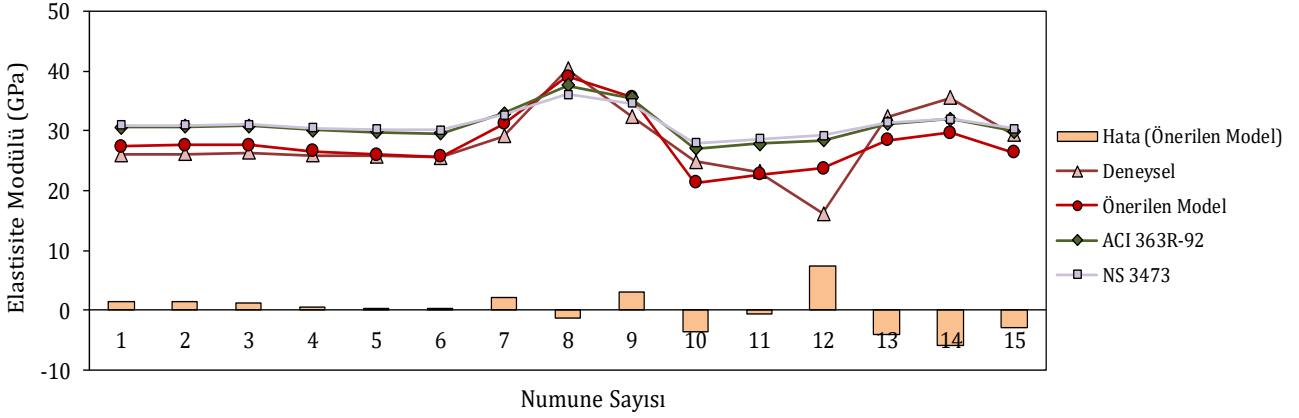
Önerilen analitik model, KPB'ler için en yakın tahmin modelini veren ACI 363R-92 ve NS 3473 standartları ile birlikte tüm veriler kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu 3 farklı tahmin modeline ait istatistiki parametreler Şekil 11'de verilmiş olan deneysel ve hesaplanan elastisite modülü grafiği içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 11. Modellere ait istatistiki parametreler

Karşılaştırmalı olarak incelenen bu üç modelin hataları kök ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) değerleri hesaplanarak istatistiki olarak değerlendirilmiştir. RMSE ve MAE değerleri sırasıyla Denklem 3 ve 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |H_m - D_m|^2} \quad (3)$$



Şekil 12. Deneysel veriler ve modellere ait hata grafiği

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |H_m - D_m| \quad (4)$$

Burada; H hesaplanan değer, D deneysel değer, N toplam veri sayısıdır. Önerilen model, ACI 363R-92 ve NS 3473 standartları için RMSE değerleri sırasıyla 3.17, 4.72 ve 5.10 olarak bulunurken MAE değerleri sırasıyla 2.41, 4.00 ve 4.36 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlar ve üç modele ait tahminlerin her biri numune için ayrı ayrı gösterildiği grafikte aynı zamanda önerilen analitik model ile deneysel veriler arasındaki farkın gösterildiği hata grafiği Şekil 12'de birlikte verilmiştir. Modellere ait istatistiki veriler ve grafikler incelendiğinde deneysel değerlere en yakın sonuçları veren ve en düşük hata oranının önerilen analitik modele ait olduğu görülmektedir. Önerilen model ile deneysel sonuçların birbirine yakın değerler verdiği sadece 12 numaralı numunede önemli bir sapma olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmadan alınmış olan bu numunede agrega olarak düşük mekanik özelliklere sahip karbonat esaslı kayaç kullanıldığından deneysel elastisite modülü değerinin normal agregalara göre oldukça düşük çıktığı belirlenmiştir [2]. Bu nedenle önerilen model ile deneysel sonuç arasındaki hata miktarı yüksektir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu deneysel çalışma kapsamında kükürt polimer betonların basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin uluslararası standartlarca önerilmiş olan analitik modeller açısından karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Saf kükürt içerisine ağırlıkça %2.5 bitüm ilavesi ile elde edilen modifiye kükürtün monoklinik kristal formunda

sabit kaldığı ve S_{β} - S_{α} dönüşümünün gerçekleşmediği belirlenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen modifikasyonun başarılı olduğu görülmüştür. KPB'lerde PÇB'lerde görüldüğü gibi, basınç dayanımındaki artışın elastisite modülünü arttırdığı anlaşılmıştır.

PÇB'lerden ve KPB'lerden elde edilen ortalama elastisite modülü değerleri sırasıyla 32.29 ve 25.98 GPa olarak bulunmuştur. KPB'lerin elastisite modüllerinin, benzer basınç dayanımı değerlerine sahip PÇB'lere göre daha düşük değerlerde kaldığı belirlenmiştir.

TS 500 (2000), ACI 363R-92, CEB-FIP 1993, NS 3473, EN 1992-1-1, BS 5400-4 (1990), VBC-95 ve SP 52-101 (2003) standartları tarafından önerilmiş olan analitik modeller kullanılarak hem PÇB hem de KPB'lerin elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Bu modeller, geleneksel çimento kullanılan betonlara ait deneysel sonuçlar kullanılarak belirlendiği için PÇB'lerde deneysel sonuçlara daha yakın tahminler verirken, KPB'lerde bu modellerin deneysel verilerden daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.

ACI 363R-92 ve NS 3473 standartları tarafından önerilmiş olan analitik modellerin KPB'lerin elastisite modülü tahminlerinde diğer standartlardaki modellere oranla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. ACI 363R-92 standardında verilen analitik modele ait tahminlerin RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 4.72 ve 4.00 olarak bulunurken bu değerler NS 3473 standardında 5.10 ve 4.36 olarak belirlenmiştir. Göz önüne alınan standartlar içinde istatistiki olarak en yakın tahmini ACI 363R-92 standardında önerilmiş olan analitik model gerçekleştirmiştir.

Deneysel çalışmadan ve literatürde yer alan deneysel verilerden yararlanılarak bu çalışma kapsamında

KPB'lerin elastisite modülü tahmini için yeni bir analitik model önerilmiştir. Bu modele ait tahminlerin RMSE ve MAE değerleri sırasıyla 3.17 ve 2.41 olarak bulunmuştur.

Önerilen model ve en yakın tahmin değerlerini veren ACI 363 R-92 ve NS 3473 standartlarındaki modeller ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve deneysel değerlere en yakın değerlere ve en düşük hata oranlarına sahip olan modelin deneysel çalışma sonunda önerilen analitik modele ait olduğu görülmüştür.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Miller, S.A., Moore F.C. 2020. Climate and health damages from global concrete production. *Nature Climate Change*, 10, 439-443.
- [2] Ghasemi S., Nikudel M.R., Zalooli A., Khomehchiyan M., Alizadeh A., Yousefvand F., Ghasemi A.M.R. 2022. Durability Assessment of Sulfur Concrete and Portland Concrete in Laboratory Conditions and Marine Environments. *Journal of Materials Civil Engineering*, 34(8), 1-14.
- [3] Kurad R., Silvestre J.D., Brito J., Ahmed H. 2017. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485-502.
- [4] Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al-Humoud J. 2004. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Management*, 24, 1049-1059.
- [5] Mehta P.K. 2009. Global concrete industry sustainability. *Concrete International*, 31(2), 45-48.
- [6] Wagenfeld J.G., Khalid A.A., Almheiri S., Slavens A.F., Calvet N. 2019. Sustainable Applications Utilizing Sulfur, A By-Product from Oil and Gas Industry: A State of the Art Review. *Waste Management*, 95, 78-89.
- [7] Bacon R.F., Davis H.S. 1921. Recent Advances in the American Sulfur Industry, *Chemical and Metallurgical Engineering*, 24, 65-72.
- [8] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M. 2009. Hydro-Mechanical Behavior of a Newly Developed Sulfur Polymer Concrete. *Cement & Concrete Composites*, 31, 186-194.
- [9] You X. 2021. Research progress of the modification in sulfur concrete. *Materials Sciences and Applications*, 12, 353-361.
- [10] Öztürk O. 2019. Kükürt ve Kükürt Polimer Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 232s, Kocaeli.
- [11] Öztürk O., Öner A. 2020. Investigation of Long Term Mechanical Properties of Sulphur Polymer Concrete and Comparison with Portland Cement Concrete. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(3), 1252-1262.
- [12] Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 2016. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction. *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
- [13] Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S. 2018. Potential for Producing Concrete Blocks Using Sulphur Polymeric Concrete in Kuwait. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(4), 327-331.
- [14] Shin M., Kim K., Gwon S.W., 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.
- [15] 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.
- [16] Contreras M., Gazquez M.J., Garcia-Diaz I., Alguacil F.J., Lopez F.A., Bolivar J.P. 2013. Valorization of Waste Ilmenite Mud in the Manufacture of Sulphur Polymer Cement. *Journal of Environmental Management*, 128, 625-630.
- [17] Mohammadi A., Dehastani M., Asce A.M., Shooshpasha I., Asadollahi S. 2014. Mechanical Properties of Sandy Soil Stabilized with Modified Sulfur. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 1-7.
- [18] Karadeniz M., Öztürk O., Kara Z.E., Opan M. 2022. Düşük basınçlı kükürt enjeksiyonunun serbest basınç mukavemetine etkisi. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 8(2), 322-342.
- [19] Türkel E.B. 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, İstanbul.
- [20] 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.
- [21] ASTM C-469, 2014. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.

- [22]Tangüner R. 2007. Uçucu Küllü Düşük ve Yüksek Mukavemetli Betonların Elastiklik Modülünün İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, İstanbul.
- [23]Vakhshouri B., Nejadi S. 2019. Empirical models and design codes in prediction of modulus of elasticity of concrete. *Front Struct Civ Eng*, 13(1), 38-48.
- [24]TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [25]ACI 363R-92,1984. Materials and General Properties of Concrete, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, Michigan.
- [26]CEB-FIB, 1993. CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, Committee Euro-International du Beton, Michigan.
- [27]NS 3473, 2003. Concrete Structures - Design and Detailing Rules, Norwegian Standards, Norway.
- [28]EN 1992-1-1, 2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- [29]BS 5400-4, 1990. Steel, concrete and composite bridges, Part 4: Code of practice for design of concrete bridges, British Standard, UK.
- [30]VBC, 1995. Voorschriften Beton TGB 1990, Constructieve Eisen en Rekenmethoden, Nederlandse.
- [31]SP-52-101, 2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing, In Gosstroj of Russia, Moscow.
- [32]Yazıcı Ş., İnan Sezer G. 2007. The effect of cylindrical specimen size on the compressive strength of concrete. *Building and Environment*, 42, 2417-2420.
- [33]Hammons M.I., Simith D.M., Wilson D.E., Reece C.S. 1993. Investigation of Modified Sulfur Concrete as a Structural Material. Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program-Final Report, CPAR-SL-93-1.