



## F Sınıfı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Çimento Harç Özelliklerine Etkisi

### Effect of Substitution of Class F Fly Ash and Blast Furnace Slag on Cement Mortar Properties

İlhami Demir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 23/12/2021

Kabul / Accepted: 22/02/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

#### Öz

Betonun hammaddesi olan çimentonun üretimi, hazır beton teknolojisinin gelişimiyle birlikte son yıllarda oldukça artmıştır. Ancak çimento üretimindeki bu artış beraberinde çevresel sorunları getirmektedir. Türkiye'nin çimento üretiminde, Avrupa' da ilk sıralarda yer aldığı bilinmektedir. Bu sebeple çimento üretiminin oluşturmuş olduğu çevresel sorunlar ülkemiz için büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunların başında ise klinker üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı gelmektedir. CO<sub>2</sub> salınımını azaltma yöntemlerinden birisi daha az klinker üretmektir. Bu ise çimentoya yakın özelliklere sahip mineral katkıların çimento yerine ikame edilmesiyle mümkün olmaktadır. Mineral katkıları, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan ancak çimento gibi bir bağlayıcı malzemeyle kullanıldıklarında bağlayıcılık kazanan malzemelerdir. Bu katkıların kullanımıyla hem CO<sub>2</sub> salınımı azaltılmakta hem de çimento kullanımından önemli tasarruflar sağlanmaktadır. Bu çalışmada, Sugözü Termik Santrali'ne ait F sınıfı uçucu kül (UK) ve Bolu Çimento'dan temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC); %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine ikame edilerek çimento harçları üretilmiştir. Harç numuneleri için yayılma deneyi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; %5 ve %10 YFC ikameli harçların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarının, referans karışımından yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca mikroyapı analizlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YFC'nin UK'ya kıyasla hidrasyon gelişiminin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

"Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, SEM"

#### Abstract

The production of cement, which is the raw material of concrete, has increased considerably in recent years with the development of ready-mixed concrete technology. However, this increase in cement production brings environmental problems. It is known that Turkey ranks first in cement production in Europe. For this reason, environmental problems caused by cement production constitute a major problem for our country. At the beginning of these problems is the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) released during clinker production. One of the ways to reduce CO<sub>2</sub> emissions is to produce less clinker. This is possible by substituting mineral additives with properties close to cement instead of cement. Mineral additives are materials that have little binding property on their own but gain binding when used with a binding material such as cement. With the use of these additives, both CO<sub>2</sub> emissions are reduced and significant savings are achieved in the use of cement. In this study, cement mortars were used by substituting F class fly ash (FA) of Sugözü Thermal Power Plant and blast furnace slag (BFS) from Bolu Cement at 0%, 5%, 10%, 15% and 20% ratios. produced. Flow test, compressive strength, flexural strength and microstructure analyzes were performed for the mortar samples. When the results obtained are examined; It was observed that the 28-day compressive and flexural strength results of 5% and 10% BFS substituted mortars were higher than the reference mixture. In addition, when the results obtained from the microstructure analyzes were examined, it was determined that the hydration development of BFS was better than FA.

#### Key Words

"Fly ash, blast furnace slag, compressive strength, flexural strength, SEM"

## 1. Giriş

Dünyada sudan sonra kişi başına en çok tüketilen malzemenin, beton olduğu yapılan istatistiksel analizler sonucunda tespit edilmiştir (Bozkurt & Sayın, 2021). Özellikle teknolojik gelişmelere bağlı olarak hazır betondaki üretim artışı, kişi başına düşen beton tüketimini her yıl daha da artırmaktadır. Avrupa Hazır Beton Birliği 2019 verileri incelendiğinde, Türkiye 67 milyon metreküp beton üretimi ile AB ülkeleri arasında birinci sırada yer almaktadır. Kişi başına düşen hazır beton üretimi ise AB ülkelerinde ortalama 0.6 metreküp iken Türkiye’de kişi başı hazır beton üretimi 0.8 metreküptür (THBB, 2021). Beton genel olarak çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır. Bunlar içerisinde betonun maliyetini belirleyen en önemli bileşen ise çimentodur. Çimento endüstrisi, kurulduğu günden bugüne, insanoğlunun birçok ihtiyacına cevap veren en önemli sektör haline gelmiştir. Ancak çimento üretiminin vermiş olduğu bazı çevresel zararlar bulunmaktadır. Bunların başında atmosfere salınan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı ve yüksek enerji tüketimi gelmektedir (Bozkurt & Sayın, 2021). Klinker üretimi esnasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı, insan tarafından atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının %5-%8’ini oluşturmaktadır (Damtoft vd., 2008; Schneider vd., 2011; Schöler vd., 2015; Ustabaş & Kaya, 2018). Ayrıca üretilen her ton portland çimentosunun atmosfere neredeyse bir ton CO<sub>2</sub> saldırdığı yapılan incelemeler sonucunda tespit edilmiştir (Uzal vd., 2007; Sevim & Şengül, 2021). CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmanın en önemli yöntemlerinden birisi, çimento üretiminde endüstriyel yan ürünlerin çimentoya ikame edilmesidir. Bu sayede CO<sub>2</sub> emisyonu önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Schöler vd., 2015; Ustabaş & Kaya, 2018).

Puzolan adı verilen bu endüstriyel yan ürünler, bağlayıcılık özelliği hiç olmayan veya çok az olan silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanlar, daha iyi bağlayıcılık özelliği kazanabilmesi için çimento esaslı malzemelerle birlikte kullanılırlar (ASTM C618, 2017; Bumanis vd., 2020; Sevim vd., 2021). Puzolanik malzemelerin çimentoya ikame edilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre puzolanların, betonun bazı mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırdığı görülmüştür (Binici, 2013; Demir vd., 2018; Sevim & Demir, 2019; Kou vd., 2021; Yun vd., 2020). Çimentoya ikame edilen en yaygın puzolanlar ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Uçucu kül (UK), kömürle çalışan elektrik santrallerinin bacalarındaki filtreler tarafından tutulan, atık kül parçalarından oluşan bir yan üründür. Yapılan çalışmalarda UK, çimentolu kompozitlerde genel olarak çimento ikame malzemesi şeklinde kullanılmış ve bu kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir (Demir vd., 2020; Kim vd., 2018; Delikkurt & Sevim, 2015) Yüksek fırın cürufu (YFC) ise pik demir üretimi sırasında açığa çıkan atık malzemedir. YFC’ nin de birçok kullanım alanı mevcuttur. Yapılan çalışmalarda YFC’nin, betonun bazı mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Bilim & Atiş, 2011; Yazıcı vd., 2008; Özbay vd., 2016; Binici vd., 2010). Burada bahsedilen puzolanlar, çimentonun hidrasyonundan kaynaklanan kalsiyum hidroksit jellerini azaltarak bağlayıcı özellikler sağlayan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri üretmektedir (Sevim vd., 2021). UK ve YFC’nin betonda katkı malzemesi olarak kullanılması ile ilgili literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Beton ve çimentoda kullanılan hem ekonomik yönden hem de ekolojik yönden katkı sağlayan bu malzemenin ileride birçok araştırmaya katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Bilim & Atiş (2011) yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda YFC içeren harçların aşınma ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak Portland çimentosu yerine kısmen YFC kullanılmasının, kür koşullarının uygun ve yeterli olması halinde dayanım ve aşınma direncinde avantajlar sağladığı görülmüştür. Delikkurt & Sevim (2015) Sugözü termik santraline ait UK’nın betonda mineral katkı olarak kullanımını araştırmıştır. Binici vd. (2013) UK, YFC ve silis dumanı (SD) içeren betonların durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YFC katkısının dayanıklılığa ve dayanıma olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Sevim & Demir (2019), UK’nın parçacık boyut dağılımını optimize etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, UK’nın optimize edilmesiyle dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilebileceği ve daha yüksek ikame oranlarında kullanılabileceği görülmüştür. Hashmi vd. (2021) düşük kalsiyumlu UK içeren betonların basınç dayanımı, elastisite modülü vs. gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. UK’nın mekanik özellikleri geliştirebileceği tespit edilmiştir. Sevim vd. (2021) partikül boyut dağılımı ile belirlemiş oldukları UK ve YFC inceliğinin harçlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak inceliğin artmasıyla fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilebileceği görülmüştür.

Yapılan literatür taraması sonucunda, Bolu Çimento’ya ait YFC ile Sugözü Termik Santrali’ne ait F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının taze ve sertleşmiş durum özelliklerine etkisinin kıyaslanması ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, Bolu Çimento’ya ait YFC ve Sugözü Termik Santrali’ne ait UK; çimentoya ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. UK ve YFC içeren çimento esaslı kompozitlerin yayılma özellikleri ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve SEM analizleri 3, 7 ve 28 günlük su kürleri için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

## 2. Deneysel Program

### 2.1. Materyal

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerinde çimento olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu (PÇ), UK, YFC, standart kum ve içilebilir su kullanılmıştır. Kullanılan PÇ, UK ve YFC’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** PÇ, UK ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	UK	YFC
SiO <sub>2</sub>	20.85	58.21	35.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.08	21.17	18.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.65	5.13	0.68
CaO	63.16	3.34	37.12
MgO	1.85	1.92	5.16
Na <sub>2</sub> O	0.33	2.05	0.44
K <sub>2</sub> O	0.42	1.83	1.47
SO <sub>3</sub>	2.89	0.44	0.51
<b>Fiziksel Özellikler</b>			
Özgül Ağırlık	3.13	2.27	2.91
Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3350	2900	3900
Kızdırma Kaybı (%)	1.78	2.45	1.52

Çimento harcı karışımlarında kullanılması planlanan UK, Sugözü Termik Santrali'nden; YFC ise Bolu Çimento'dan temin edilmiştir. ASTM C618 (2017) standardına göre SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerinin %70'in üzerinde ve CaO miktarının %10'dan az olması durumunda, UK'nın sınıfı "F (düşük kireçli)" olarak belirtilmiştir. Tablo 1' de verilen kimyasal analiz verileri incelendiğinde Sugözü Termik Santrali'ne ait UK'nın F sınıfı olduğu görülmektedir.

## 2.2. Metot

### 2.2.1. Karışım içeriği

Çalışma sırasında çimento harçları TS EN 196-1'e uygun olarak hazırlanmıştır. Çimento harçları, çimento ağırlığına %0 (Referans), %5, %10, %15 ve %20 oranında UK ve YFC harçlara ayrı ayrı ikame edilerek üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen harçların su/bağlayıcı oranı (S/B) 0.50'dir. Tablo 2'de karışımların malzeme miktarları gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Çimento harcı malzeme miktarları

Karışım Kodu	Su (g)	UK(%)	YFC (%)	UK (g)	YFC (g)	Çimento (g)	Kum(g)
Ref	225	0	-	0.0	-	450.0	1350
UK5	225	5	-	22.5	-	427.5	1350
UK10	225	10	-	45.0	-	405.0	1350
UK15	225	15	-	67.5	-	382.5	1350
UK20	225	20	-	90.0	-	360.0	1350
YFC5	225	-	5	-	22.5	427.5	1350
YFC10	225	-	10	-	45.0	405.0	1350
YFC15	225	-	15	-	67.5	382.5	1350
YFC20	225	-	20	-	90.0	360.0	1350

### 2.2.2. Yayılma deneyi

Bu kısımda mini çökme testi ile harç karışımlarının işlenebilirlik ölçümleri yapılmıştır. Deney yapılırken TS EN 196-1'e uygun şekilde hazırlanan harç karışımları, akış tablası üzerindeki kesik koniye doldurulmuştur. Doldurma işlemi 2 kat halinde ve her katta 25 sıkıştırma işlemi uygulanarak yapılmıştır. Kesik konik kalıp yavaşça yukarı kaldırıldıktan sonra sarsma cihazı döndürmek suretiyle TS EN 1015-3'e uygun şekilde 15 saniyede 25 kez vuruş yapılmıştır. Son olarak tabla üzerindeki yayılmış harcın her iki doğrultusundaki yayılma çapı ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

### 2.2.3. Harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımının belirlenmesi

Çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e uygun olarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımı için 3, 7 ve 28 gün normal su kürüne tabi tutulan 40×40×160 mm ölçülerindeki prizmatik çimento harçları kullanılmıştır. Basınç dayanımları ise eğilme dayanımı deneyi sonucunda oluşan altı adet 40×40 mm ölçülerindeki numuneler kullanılarak tespit edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygun kapasitede ve TS EN 196-1'e uygun sırasıyla eğilme için 50 N/s ve basınç için 2400 N/s yükleme hızlarında ayarlanarak gerçekleştirilmiştir.

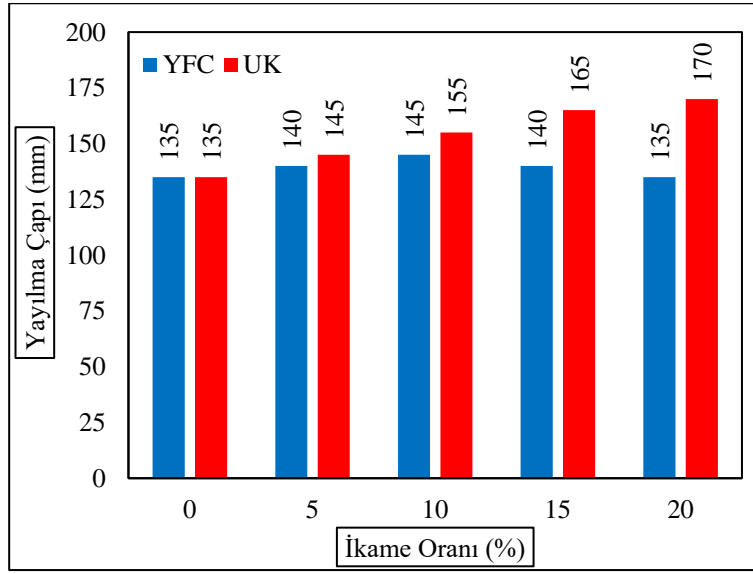
### 2.2.4. Mikroyapı analizi

Bu kısımda, 7 ve 28 günlük su kürüne tabi olan Ref, UK10, UK20, YFC10 ve YFC20 kodlu harçların mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Yayılma deneyi bulguları

Şekil 1’de UK ve YFC ikameli harçların yayılma çapları gösterilmiştir.

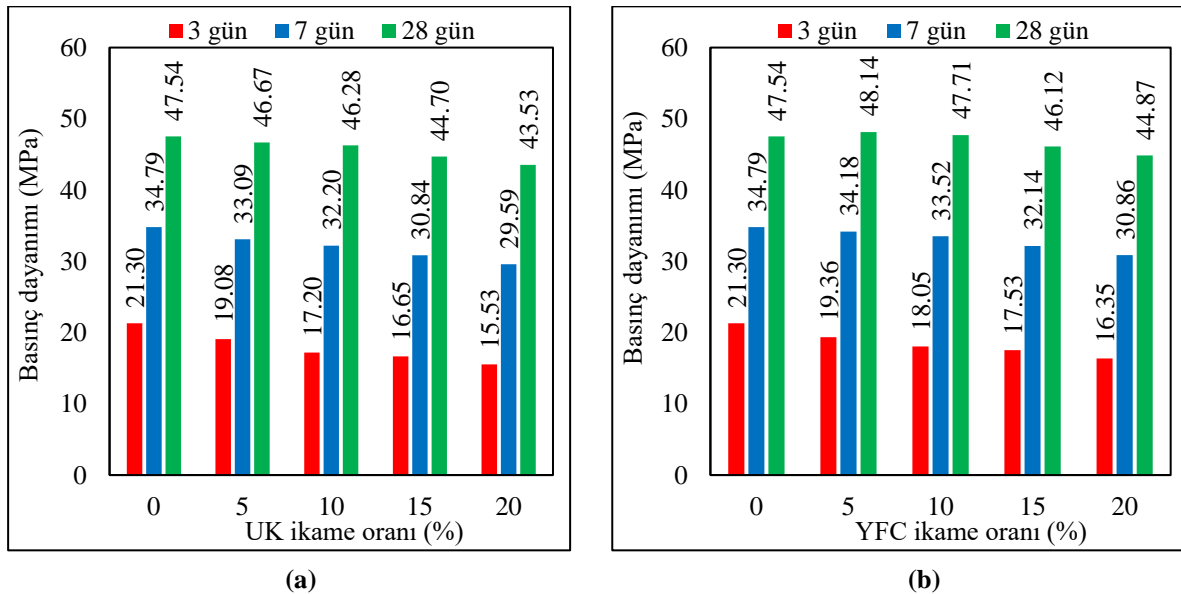


Şekil 1. Harçların yayılma çapları

UK ikameli harçlara ait sonuçlar incelendiğinde, ikame oranı arttıkça yayılma çaplarının arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak UK’nın sahip olduğu küresel morfolojik özellik gösterilebilir. Literatürde UK ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, ikame oranı arttıkça harçların yayılma çapının arttığı, dolayısıyla elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Sevim vd., 2021; Sevim ve Demir, 2019). UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların yayılma çapları, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %7.41, %14.81, %22.2 ve %25.93 oranlarında artış göstermiştir. YFC ikameli harçların yayılma çapları incelendiğinde; YFC5, YFC10 ve YFC15 kodlu harçların yayılma çapları artarken YFC20 kodlu harçların yayılma çapı “Ref” kodlu harçlarla aynı çıkmıştır. Bunun nedeni olarak YFC’nin blaine inceliğinin, çimentonun ve UK’nın blaine inceliğinden daha yüksek olması ve belirli bir oranı aşttıktan sonra YFC ikameli harçların akıcılığının azalması ve dolayısıyla yayılma çapının düşmesi gösterilebilir. YFC5, YFC10 ve YFC15 kodlu harçların yayılma çapları “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %3.7, %7.41 ve %3.7 oranlarında artış göstermiştir.

#### 3.2. Basınç dayanımı bulguları

Şekil 2’de UK ve YFC ikameli harçların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir.



(a)

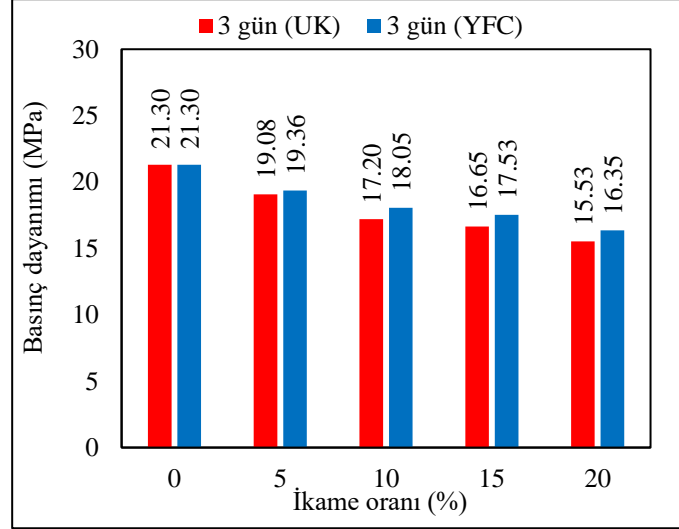
(b)

Şekil 2. (a) UK ve (b) YFC ikameli harçların basınç dayanımları

Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarının 3, 7 ve 28 günlük su kürleri için sürekli olarak azaldığı görülmüştür. YFC ikameli harçlarda ise 3 ve 7 günlük su kürlere basınç dayanımları referans harçlara göre azalmıştır. Ancak 28 günlük su kürlünde ise YFC5 ve YFC10 kodlu harçlar, “Ref” kodlu harçların basınç dayanımını geçmiştir. Bu durum puzolanların hidrasyon reaksiyonunun geç olduğunu, özellikle 28 gün ve sonrasındaki kür yaşı için basınç dayanımlarında artış sağlayabileceğini bir kez daha ispatlar niteliktedir.

### 3.2.1. 3 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 3’te UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

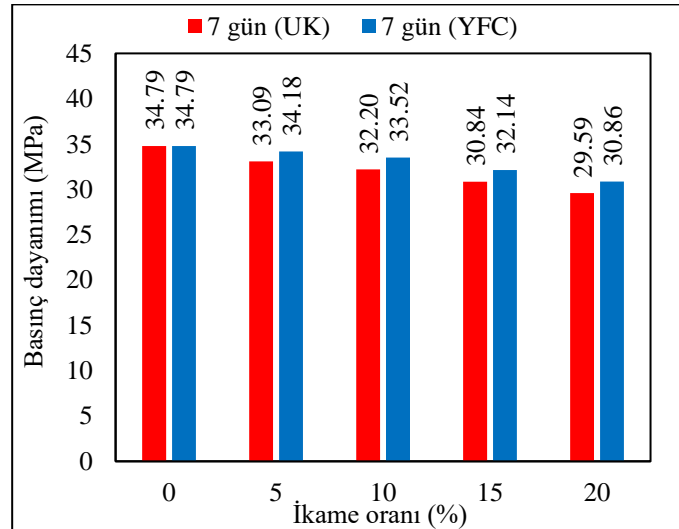


Şekil 3. UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük basınç dayanımı sonuçları

Şekil 3 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak UK ve YFC gibi puzolanların hidrasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi söylenebilir. Fakat YFC kullanılması durumunda basınç dayanımındaki bu azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni ise YFC’nin blaine inceliğinin UK’dan daha yüksek yani daha ince olması ve hidrasyon gelişiminin UK’dan daha yüksek olmasıdır. Şekil 3 incelendiğinde UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %10.42, %19.25, %21.83 ve %27.09 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %9.11, %15.26, %17.7 ve %23.24 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %1.45, %4.71, %5.02 ve %5.02 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

### 3.2.2. 7 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 4’te UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

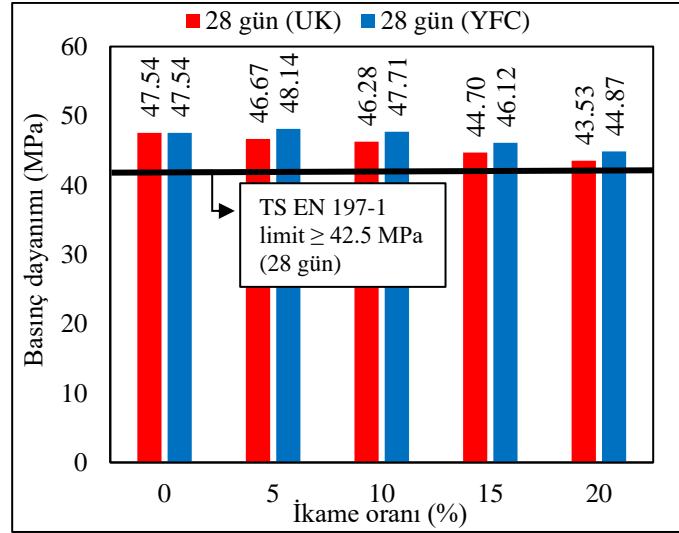


Şekil 4. UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak 3 günlük dayanımlarda olduğu gibi puzolanların hidrasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi gösterilebilir. Yine 3 günlük dayanım gelişiminde olduğu gibi YFC kullanılması durumunda basınç dayanımındaki azalışların, UK'ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 4 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %4.89, %7.44, %11.35 ve %14.95 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.75, %3.65, %7.62 ve %11.30 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %3.19, %3.94, %4.04 ve %4.12 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

### 3.2.3. 28 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 5'te UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.



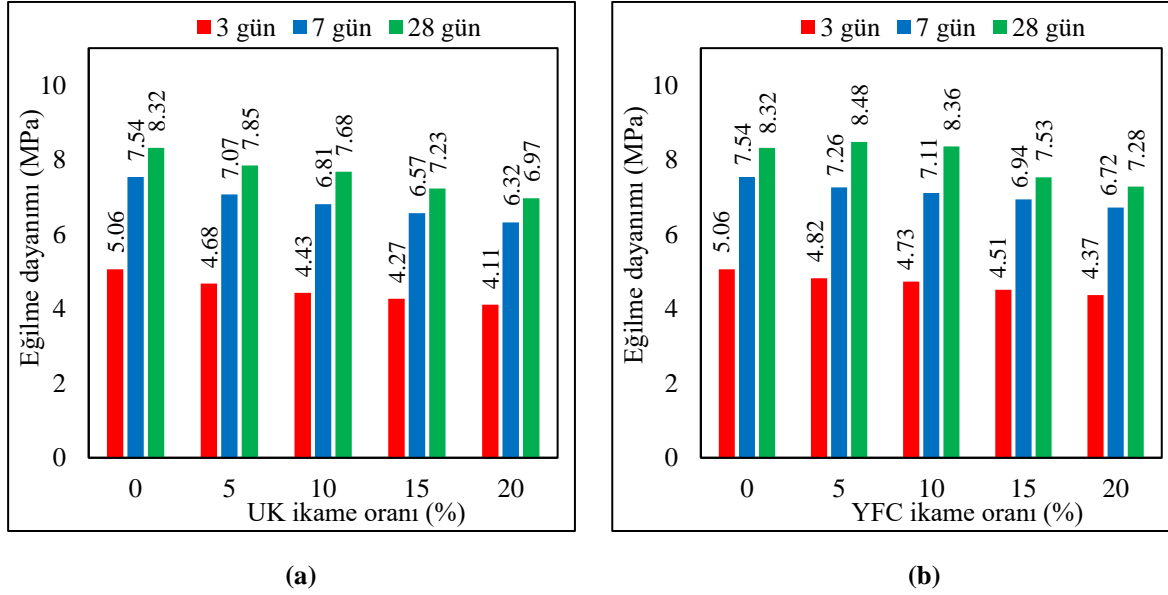
Şekil 5. UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

3 ve 7 günlük su kürüne tabi tutulan harçlarda olduğu gibi UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımları düşmüştür. YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, YFC5 kodlu harçların en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, YFC10 kodlu harçların basınç dayanımının ise "Ref" kodlu harçların basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine 3 ve 7 günlük numunelerde olduğu gibi YFC ikameli harçların basınç dayanımı değerleri UK ikameli harçlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.83, %2.65, %5.97 ve %8.44 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5 ve YFC10 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.26 ve %0.36 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %2.99 ve %5.62 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları, YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %3.05, %3.0, %3.08 ve %2.99 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Ayrıca tüm harç gruplarının basınç dayanımları, TS EN 197-1'de verilen minimum basınç dayanımı (42.5 MPa) değerinin üzerinde kalmıştır.

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, UK ve YFC gibi yüksek miktarlardaki atık haldeki puzolanların değerlendirilmesi ile çimento kullanımından önemli tasarruflar sağlanabileceği görülmüştür. Çimento üretiminin dünyada yaklaşık %7 oranında sera gazı emisyonundan sorumlu olduğu göz önüne alınırsa, atık haldeki puzolanların kullanılmasıyla bu oranın önemli ölçüde azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu durum sürdürülebilir bir çevre açısından büyük önem arz etmektedir.

### 3.3. Eğilme dayanımı bulguları

Şekil 6'da UK ve YFC ikameli harçların 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları gösterilmiştir.

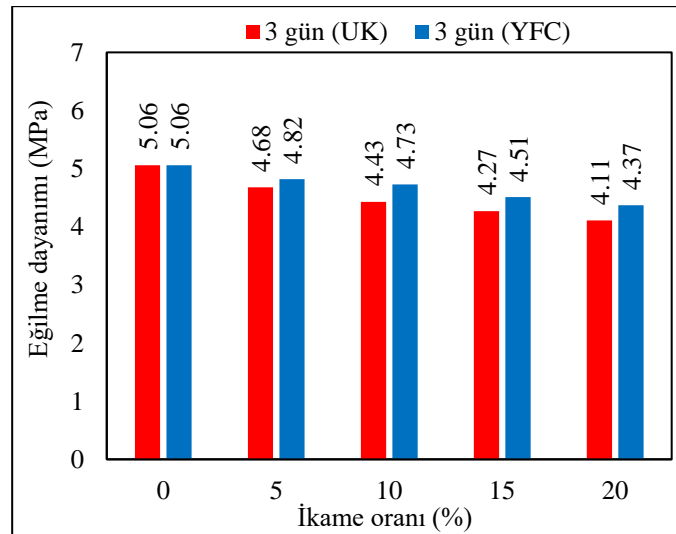


Şekil 6. (a) UK ve (b) YFC ikameli harçların eğilme dayanımları

Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının 3, 7 ve 28 günlük su küreleri için sürekli olarak azaldığı görülmüştür. YFC ikameli harçlarda ise 3 ve 7 günlük su kürelerinde eğilme dayanımları “Ref” harçlarına göre azalmıştır. Ancak 28 günlük su kürelerinde YFC5 ve YFC10 kodlu harçlar “Ref” harçlarının eğilme dayanımını geçmiştir. Elde edilen sonuçlar basınç dayanımlarının sonucuna benzer çıkmıştır.

### 3.3.1. 3 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 7’de UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

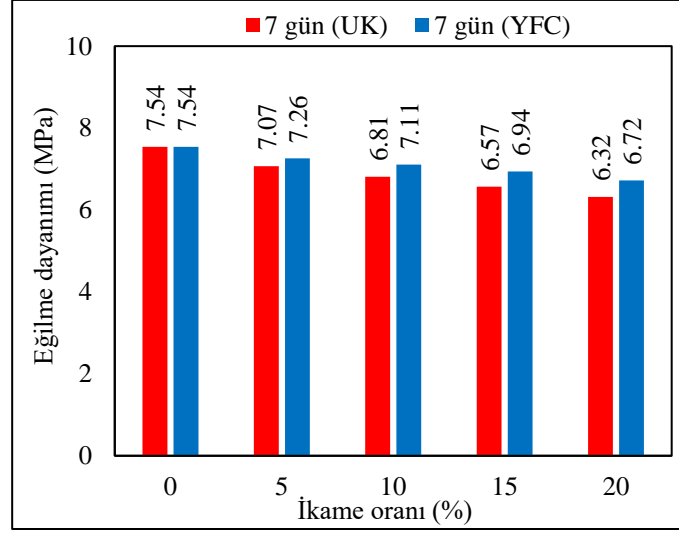


Şekil 7. UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 7 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak UK ve YFC gibi puzolanların hidratasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi söylenebilir. Fakat YFC kullanılması durumunda eğilme dayanımındaki bu azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, basınç dayanımında olduğu gibi YFC’nin UK’dan daha ince olması ve hidratasyon gelişiminin UK’dan daha yüksek olması şeklinde yorumlanabilir. Şekil 7 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %7.51, %12.45, %15.61 ve %18.77 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %4.74, %6.52, %10.87 ve %13.64 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarından sırasıyla %2.90, %6.34, %5.32 ve %5.95 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

### 3.3.2. 7 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 8’de UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

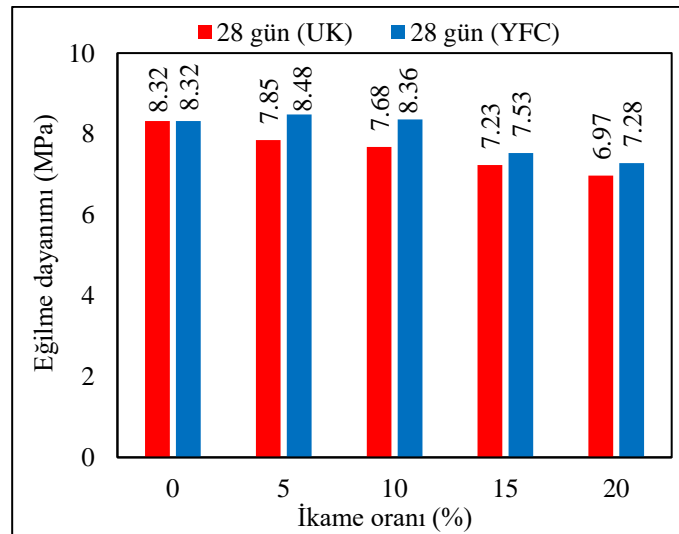


Şekil 8. UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 8 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak 3 günlük dayanımlarda olduğu gibi puzolanların hidratasyonunu geç tamamlaması gösterilebilir. Yine 3 günlük dayanım gelişiminde olduğu gibi YFC kullanılması durumunda eğilme dayanımındaki azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 8 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %6.23, %9.68, %12.86 ve %16.18 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %3.71, %5.70, %7.96 ve %10.88 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarından sırasıyla %2.62, %4.22, %5.33 ve %5.95 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

### 3.3.3. 28 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 9’da UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.



Şekil 9. UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları

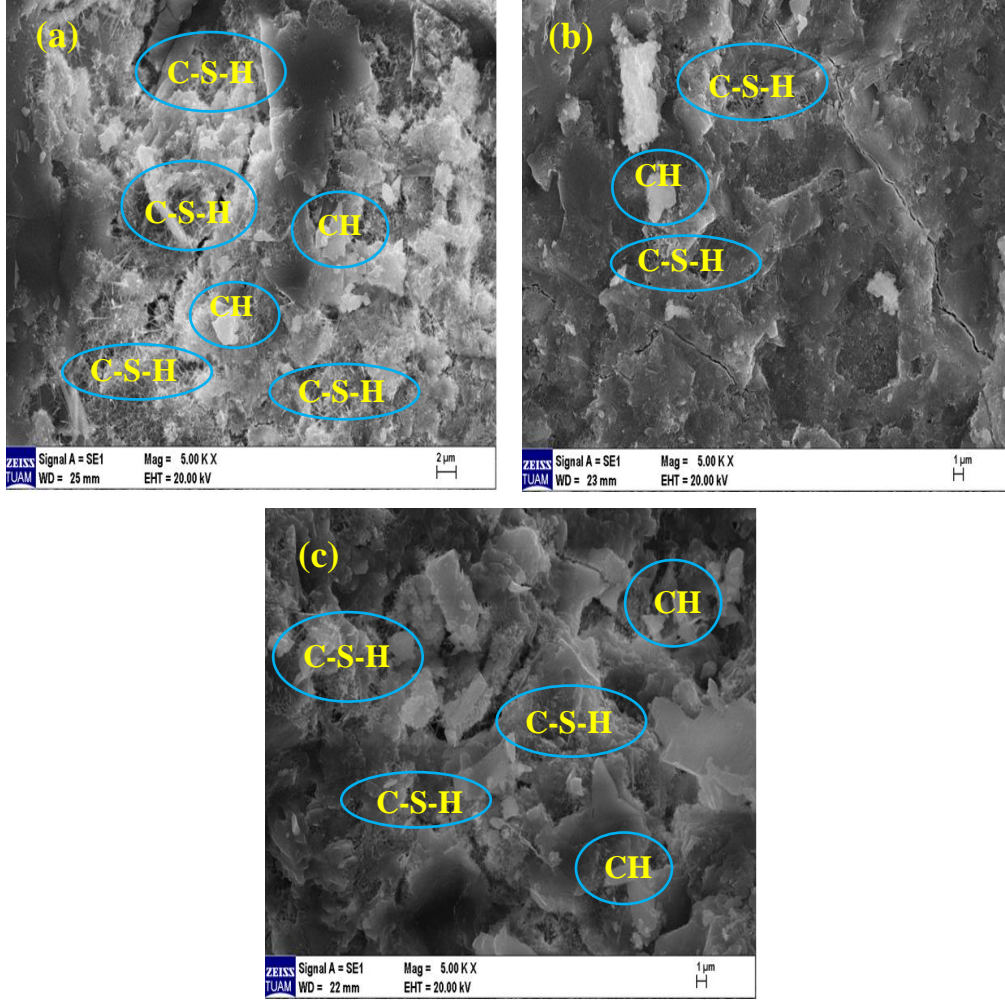
3 ve 7 günlük su kürüne tabi tutulan harçlarda olduğu gibi UK ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları düşmüştür. YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise basınç dayanımında olduğu gibi YFC5 kodlu harçların en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu, YFC10 kodlu harçların eğilme dayanımının ise “Ref” kodlu harçlarınkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine 3 ve 7 günlük numunelerde olduğu gibi YFC ikameli harçların eğilme dayanımı değerleri UK ikameli harçlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 9 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %5.65, %7.69, %13.10 ve %16.23 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5 ve YFC10



kodlu harçların eğilme dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.92 ve %0.48 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %9.50 ve %12.5 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %7.43, %8.13, %3.98 ve %4.26 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

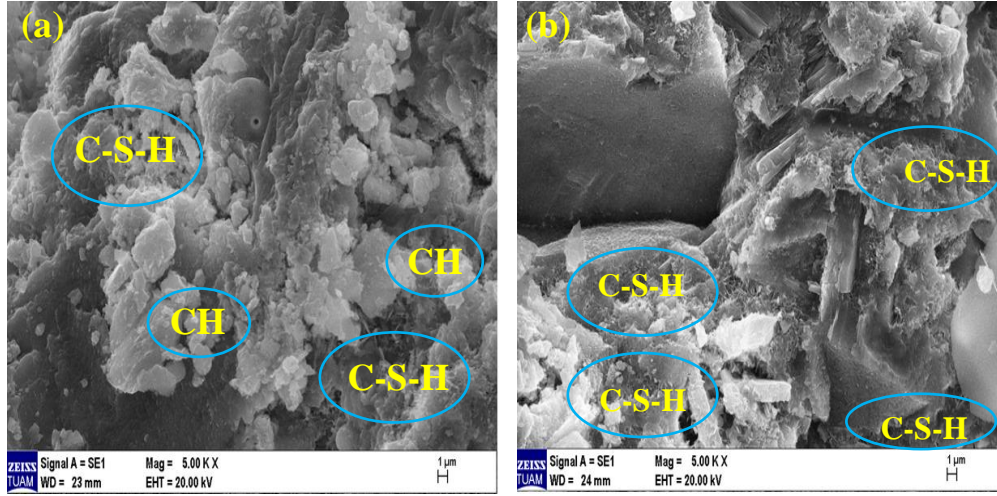
### 3.4. Mikroyapı analizi

#### 3.4.1. 7 günlük SEM görüntüleri



Şekil 10. (a) Ref, (b) UK10 ve (c) YFC10 kodlu harçlara ait 7 günlük SEM görüntüleri

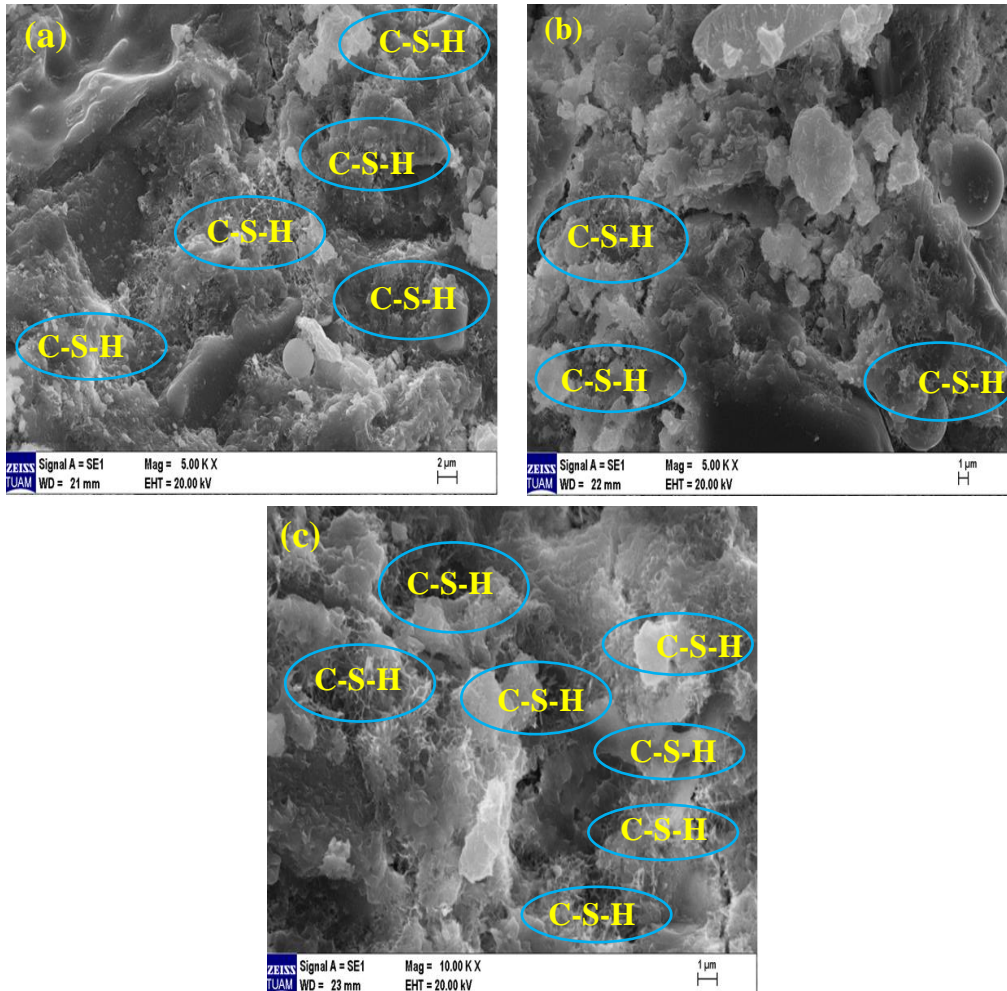
Şekil 10'da Ref, UK10 ve YFC10 kodlu harçların 7 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; referans karışımlarda, ikameli karışımlara kıyasla daha yoğun CSH görülmektedir. İkameli karışımlarda CSH yoğunluğunun az olması, puzolanların hidrasyon gelişiminin ilk günlerde yavaş olmasına bağlanabilir. Ayrıca YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, UK10 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak YFC'nin blaine inceliğinin, UK'dan daha yüksek olmasına ve bu nedenle de hidrasyon gelişiminin yüksek olmasına bağlanabilir.



Şekil 11. (a) UK20 ve (b) YFC20 kodlu harçlara ait 7 günlük SEM görüntüleri

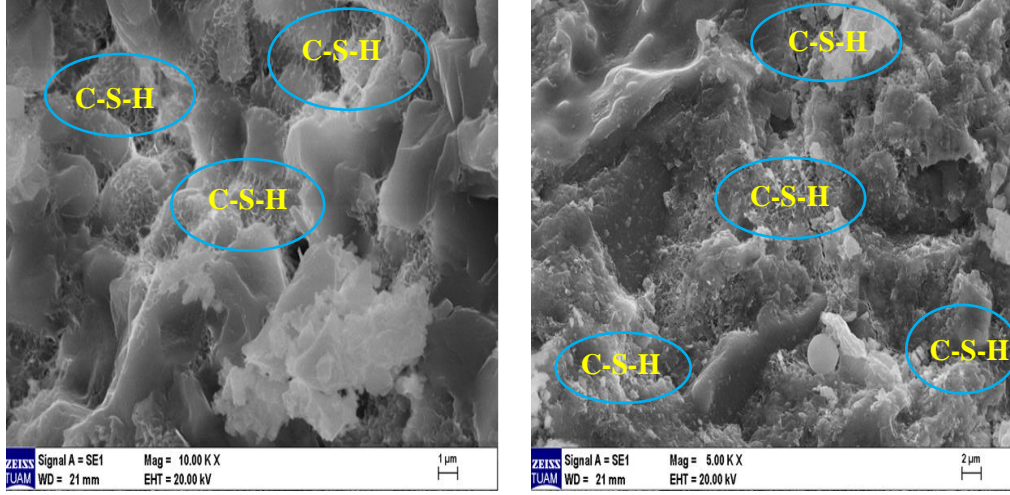
Şekil 11’de UK20 ve YFC20 kodlu harçların 7 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; Şekil 10 (a)’ da verilen referans karışımının CSH yoğunluğunun, UK20 ve YFC20 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 10’da verilen UK10 ve YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, Şekil 11’de verilen UK20 ve YFC20 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni şudur: puzolanların erken yaşlardaki hidrasyon gelişimi yavaş olduğu için ikame oranı arttıkça hidrate eleman miktarı azalmaktadır. Son olarak YFC20 kodlu harçlarda, UK20 kodlu harçlara göre CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.

### 3.4.2. 28 günlük SEM görüntüleri



Şekil 12. (a) Ref, (b) UK10 ve (c) YFC10 kodlu harçlara ait 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 12’de Ref, UK10 ve YFC10 kodlu harçların 28 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; YFC10 kodlu harçlarda, Ref ve UK10 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun CSH görülmektedir. 7 günlük SEM görüntüleriyle kıyaslandığında daha yoğun bir CSH oluştuğu, puzolanların hidrasyon gelişimlerinin sonraki günlerde daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca Ref kodlu harçlara ait CSH yoğunluğunun, UK10 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarını da destekler niteliktedir.



Şekil 13. (a) UK20 ve (b) YFC20 kodlu harçlara ait 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 13’te UK20 ve YFC20 kodlu harçların 28 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; Şekil 12 (a)’ da verilen referans karışımının CSH yoğunluğunun, UK20 ve YFC20 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 12’de verilen UK10 ve YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, Şekil 13’te verilen UK20 ve YFC20 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak ikame oranı arttıkça hidrate eleman miktarının azaldığı gösterilebilir. Son olarak YFC20 kodlu harçlarda, UK20 kodlu harçlara göre CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, UK ve YFC ikameli harçların taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla yayılma deneyi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- UK ikame oranı arttıkça yayılma çapları artmıştır. UK’nın küresel morfolojik yapısından dolayı işlenebilirliği önemli ölçüde artırabileceği tespit edilmiştir.
- YFC ikame oranı arttıkça belirli bir orana kadar yayılma çapı artarken sonrasında düşüşe geçmiştir. Bu durumun nedeni YFC’nin inceliğinin yüksek olması ve dolayısıyla yüksek oranda kullanılması halinde su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği düşürmesine bağlanmıştır.
- 3 ve 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Puzolanların ilk günlerdeki hidrasyon gelişimlerinin düşük olması bu durumun nedeni olarak gösterilebilir.
- 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. YFC5 ve YFC10 kodlu harçların basınç dayanımları ise referans numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar puzolanların hidrasyon gelişimlerinin ileriki yaşlarda daha iyi olduğunu destekler niteliktedir. Ayrıca tüm karışımların TS EN 197-1’de verilen 28 günlük minimum basınç dayanımı (42.5 MPa) değerini geçtiği tespit edilmiştir.
- Genel olarak YFC ikameli karışımların basınç dayanımı değerlerinin UK ikameli karışımlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak YFC’nin inceliğinin yüksek olması ve hidrasyon gelişiminin UK’ya kıyasla daha iyi olduğu gösterilebilir.
- 3 ve 7 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında, basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir. UK ve YFC ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları düşmüştür.
- 28 günlük eğilme dayanımlarında ise en yüksek değer YFC5 kodlu harçlarda görülmüştür.
- 7 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde; UK10, UK20, YFC10 ve YFC20 kodlu harçların CSH yoğunluğunun, referans karışımlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum puzolanların erken yaşlarda hidrasyon gelişimlerinin düşük olmasına bağlanmıştır.
- 28 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde YFC10 kodlu harçların, referans karışımlarına kıyasla CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu; referans karışımların CSH yoğunluğunun ise UK10 kodlu harçlardan daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, puzolanların hidratasyon gelişimlerinin ilk günlerde yavaş sonraki günlerde ise daha hızlı olduğu görülmüştür. Ayrıca YFC ikameli karışımların hidratasyon gelişiminin UK ikameli karışımlardan daha iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; Sugözü Termik Santrali'ne ait UK ile Bolu Çimento'dan temin edilen YFC'nin çimentoya %20 oranına kadar ikame edilerek kullanılabilceği görülmüştür. Bu puzolanlar basınç dayanımında düşüslere neden olsa da 28 günlük değerler kontrol edildiğinde tüm karışımların minimum değer (42.5 MPa) üzerinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca, çimento üretiminin dünyadaki CO<sub>2</sub> salınımının %7'sine sebep olduğu düşünöldüğünde, bu puzolanların değerlendirilmesiyle hem çevre kirliliği büyük ölçüde azaltılacak hem de çimento üretim maliyetleri önemli ölçüde düşürülecektir.

## Referanslar

ASTM C618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

Bilim C. & Atış C. D. (2011). "Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların aşınma ve mukavemet özellikleri" Politeknik Dergisi, 14(2), 101-107.

Binici H., Eken M. & Dinçer A. (2013). "Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri" Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Faköltei Dergisi, 28 (1), 11-20.

Binici H., Sevinç A. H. & Durgun, M. Y. (2010). "Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri" KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 2010.

Bozkurt N. & Sayın N. (2021). "Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması" Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9 (2021), 1159-1173.

Bumanis G., Vitola L., Stipniece L., Locs J., Korjakins A. & Bajare D. (2020) "Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production" Case Studies in Construction Materials, 2020, 13, e00424

Damtoft J.S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. & Gartner E.M. (2008). "Sustainable development and climate change initiatives" Cement and Concrete Research, 38 (2), 115-127.

Delikkurt B. C. & Sevim U. K. (2015). "Sugözü uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi" Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4(1), 47-58.

Demir I., Sevim O., Ozel G. & Dogan O. (2020). "Microstructural, physical and mechanical properties of aerated concrete containing fly ash under high temperature and pressure" Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials, 2020, 50(2), 240-249.

Demir İ., Güzelkücük S. & Sevim Ö. (2018). "Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution" Eng. Sci. Tech., Int. J. 21 (3), 275-283.

Hashmi A. F., Shariq M. & Baqi, A. (2021). "An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction" Construction and Building Materials, 283(2021), 122772.

Kim T., Davis J.M., Ley M.T., Kang S. & Amrollahi P. (2018). "Fly ash particle characterization for predicting concrete compressive strength" Construction and Building Materials, 165, 560-571.

Kou R., Guo M-Z., Han L., Li J-S., Li B., Chu H., Jiang L., Wang L., Jin W. & Poon C. S., "Recycling sediment, calcium carbide slag and ground granulated blast-furnace slag into novel and sustainable cementitious binder for production of eco-friendly mortar" Construction and Building Materials. 305(2021), 124772.

Özby E., Erdemir M. & Durmuş H.I. (2016). "Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties-A review" Construction and Building Materials, 105, 423-434.

Schneider M., Romer M., Tschudin M. & Bolio H. (2011). "Sustainable cement production at present and future" Cement and Concrete Research, 41 (7), 642-650.

Schöler A., Lothenbach B., Winnefeld F. & Zajac M. (2015). "Hydration of quaternary portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder" Cement and Concrete Composites 55 (2015), 374-382.

- Sevim Ö. & Demir İ. (2019). “Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution” *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019), 266-273.
- Sevim Ö. & Demir İ. (2019).” Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness” *Construction and Building Materials*, 195, 104-114.
- Sevim Ö. & Sengul C. G. (2021). “Comparison of the influence of silica-rich supplementary cementitious materials on cement mortar composites: Mechanical and microstructural assessment” *Silicon*, 13, 1675-1690.
- Sevim Ö., Baran M. & Demir Ş. (2021) “Mechanical and physical properties of cementitious composites containing fly ash or slag classified with help of particle size distribution” *Romanian Journal of Materials*, 51 (1), 67-77.
- TS EN 1015-3, Kagir harcı- Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)
- TS EN 196-1, Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2016.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2021). Dünyada Sektör. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.thbb.org/sektor/dunyada-sektor/>
- Ustabaş İ. & Kaya, A. (2018). “Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag” *Construction and Building Materials*, 164 (2018), 297-307.
- Uzal B., Turanlı L. & Mehta P.K. (2007) “High-volume natural pozzolan concrete for structural applications” *ACI Mater J* 104 (5), 535-538;
- Yazıcı H., Yiğiter H., Karabulut A.Ş., Baradan B. (2008). “Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete” *Fuel*, 87(12), 2401-2407.
- Yun C. M., Rahman M. R., Phing C. Y. W., Chie A. W. M. & Bakri M.K.B. (2020). “The curing times effects on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar” *Construction and Building Materials*. 260 (2020), 120622.