

Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Temelli Geopolimer Sistemlerde Atık Demir Tozunun Agrega Yerine Kullanımının Araştırılması

Uğur DURAK^{1*}, Ahmet Ayberk ŞİMŞEK²

^{1,2}Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

¹<https://orcid.org/0000-0003-2731-3886>

²<https://orcid.org/0000-0003-2871-2619>

*Sorumlu yazar: ugurdurak@erciyesl.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 27.08.2021

Kabul tarihi: 14.10.2021

Online Yayınlanma: 18.07.2022

Anahtar Kelimeler:

Uçucu kül

Yüksek fırın cürufu

Atık demir tozu

Geopolimer

Bu çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerde atık demir tozu kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada atık demir tozları ince agrega ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Uçucu kül ile üretilen harç numunelerde aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmış ve numuneler 24-48 saat 75°C ve 100°C'de ısı küre tabii tutulmuştur. Yüksek fırın cürufu ile üretilen harç numunelerde ise aktivatör olarak sodyum metasilikat kullanılmış ve numuneler 3, 7, 28 ve 90 gün boyunca oda koşullarında havada kür edilmiştir. Kür süresini tamamlayan tüm harç numunelerin birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca her iki karışım sisteminde de en iyi sonuçları veren numunelerin su emme ve boşluk oranları ile aşınma dirençleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, agrega ile ikame edilerek kullanılan atık demir tozunun yüksek fırın cürufu sistemlerde olumlu sonuçlar vermezken, uçucu kül ile üretilen sistemlerde aşınma, eğilme ve basınç dayanımlarına pozitif katkı sağlayabildiğini göstermiştir.

Investigation of The Use of Waste Iron Powder Instead of Aggregate in Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Systems

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 27.08.2021

Accepted: 14.10.2021

Published online: 18.07.2022

Keywords:

Fly ash

Blast furnace slag

Waste iron powder

Geopolymer

In this study, the use of waste iron powder in geopolymer mortar samples produced by using fly ash and blast furnace slag was investigated. In the study, waste iron powders were used by replacing the aggregate with 10%, 20% and 30% by weight. The mortar samples produced with fly ash were activated by using sodium hydroxide as an activator and samples were heat cured at 75°C and 100°C for 24-48 hours. The mortar samples produced with blast furnace slag were activated by using sodium metasilicate as an activator and samples were cured at room temperature in air for 3, 7, 28, and 90 days. After the curing periods the unit weight, flexural and compressive strengths of all mortar samples were determined. In addition, the water absorption and porosity, and abrasion resistance of the samples that gave the best results in both mixing systems were measured. The obtained results showed that while the waste iron powder, which was used as a substitute for aggregate, did not give positive results in blast furnace slag systems, it could contribute positively to abrasion, flexural and compressive strengths in systems produced with fly ash.

To Cite: Durak U., Şimşek AA. Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Temelli Geopolimer Sistemlerde Atık Demir Tozunun Agrega Yerine Kullanımının Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 812-828.

1. Giriş

Günümüzde çimento üretimi çok fazla enerji gerektirmekte ve üretimi esnasında yüksek karbondioksit salınımı ile çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan portland çimentosu imalatında kalker ve kil ham maddeleri belirli sıcaklıklarda pişirilir ve bu işlem esnasında yüksek sıcaklık kullanıldığı için yoğun bir enerji kullanımı gerçekleşir. Ayrıca bu işlem atmosfere yüksek miktarda karbondioksit salınımının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Şimşek, 2004; Neville, 2011; Erdoğan, 2015). Bu nedenle günümüzde çimento sistemlerine alternatif bağlayıcılar geliştirilmek üzere çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda çalışılan alternatif bağlayıcılardan birisi de uçucu kül veya cüruf ile imal edilen geopolimerlerdir (Atiş ve ark., 2015; Atabey ve ark., 2020; Durak ve ark., 2020; Kaya ve ark., 2020; Yurt ve ark. 2020; Durak ve ark., 2021).

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimer harç veya beton üretimi bilinen bir konu olmakla birlikte, bu sistemlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin; uçucu kül ile üretilen geopolimer sistemler ısı küre ihtiyaç duymakta ve bu durum ısı küre esnasında harcanan enerjiden dolayı ekonomik bir problem oluşturmaktadır. Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen sistemlerde ise çeşitli dayanıklılık problemlerinin ortaya çıktığı gözlenmektedir (Provis ve Van Deventer, 2009; Aydın, 2010; Özodabaş, 2014; Provis, 2014; Bingöl ve ark., 2020).

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen sistemlerde ortaya çıkan bu olumsuz durumlar bu malzemelerin kullanımını sınırlandırmakta ve atık ürün olan bu malzemelerin çevre kirliliği oluşturmaya neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimer sistemlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bu sistemlerin üretiminde kullanılan ince agrega ile atık demir tozları ikame edilmiş ve elde edilen yeni karışım sisteminin dayanım ve bazı dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Konu ile ilgili yapılan literatür araştırması aşağıda sunulmuştur.

Binici ve ark., (2015) yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında, atık demir tozu içeren harç ve betonlar üretmiş ve ürettikleri numunelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Harç ve beton numunelerin üretiminde atık demir tozunu ince agrega ile %10, %20 ve %30 oranlarında ağırlıkça yer değiştirerek karışım sistemine ilave etmişlerdir. Yapmış oldukları laboratuvar çalışmalarında üretmiş oldukları numunelere eğilme, basınç, ultrasonik atımlı dalga hızı, aşınma direnci ve kılcal su emme deneylerini uygulamışlardır. Ayrıca harç numunelerin sülfat ve tuza karşı dayanımlarını da araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre atık demir tozunun agrega ile %20 oranında ikame edilmesi durumunda dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde iyileşmeler sağladığını belirlemişlerdir.

Taş ve ark., (2013) yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında endüstriyel demir talaşı atığının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini irdelemişlerdir. Bu amaçla TS 802'ye uygun olarak C25 ve C30 beton özelliklerini sağlayan referans beton ve demir talaşı atığını %50 oranında ince agrega ile yer değiştirerek demir talaşı katkılı beton numuneler üretmişlerdir. Çalışmalarında 150×150×150 mm³'lük numuneler üreterek 7 ve 28 gün su kürüne tabi tutmuşlardır. Çalışma kapsamında üretilen

numunelerin basınç dayanımı ve yüzey sertliği özelliklerini belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, endüstriyel demir talaşı atığının kullanıldığı numunelerin basınç dayanımları ve yüzey sertliklerinin, referans beton numunelerinden daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Abraham, ve Sindhu (2017) yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek adına ince agrega yerine %5, %10 ve %15 oranlarında demir tozu kullanmışlardır. Üretmiş oldukları numunelerin basınç, eğilme ve eğilmede çekme dayanımlarını 7 ve 28 gün kür süreleri sonunda belirlemişlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre demir tozunun betonun basınç, eğilme ve eğilmede çekme dayanımlarını artırdığını ve optimum demir tozu kullanım miktarının %10 olduğunu tespit etmişlerdir.

Kim ve ark., (2015) yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında demir tozu ile agregayı hacimce %2 ve %4 oranlarında yer değiştirerek harç numuneler üretmişlerdir. Üretmiş oldukları numunelerde bağlayıcı olarak çimento kullanmışlardır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı olarak 0,65 agrega/bağlayıcı oranı olarak ise 3 kullanmışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre demir tozu kullanımının numunelerde karbonatlaşma derinliği ve korozyon etkilerini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Ghannam ve ark., (2016) yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında demir tozunun kum ile yer değiştirilmesi durumunda beton özelliklerinin nasıl etkileneceğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmaları gerçekleştirmek için küp, silindir ve kiriş numuneler üretmişlerdir. Çalışmada demir tozunu agrega ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirmişlerdir. Elde ettikleri dayanım sonuçlarına göre en iyi sonucun %20 demir tozu ilavesi durumunda meydana geldiğini tespit etmişlerdir. En yüksek artış oranının elde edildiği %20 demir tozu ilavesi durumunda, numunelerin 28 gün sonunda eğilme dayanımlarının %45, basınç dayanımlarının %33 ve eğilmede çekme dayanımlarının %15'e varan oranlarda arttığını gözlemlemişlerdir.

Yapılan literatür araştırmasına göre atık demir tozu genel olarak çimento sistemlerinde agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Atık demir tozu kullanımı ile çimento sistemlerinde dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde iyileşmeler elde edilebilmiştir. Fakat atık demir tozunun geopolimer sistemlerde kullanımı ile ilgili çalışmalar literatürde kısıtlı sayıdadır. Bu nedenle bu çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde agrega ile atık demir tozu ikame edilerek geopolimer harç numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerin birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımları ile aşınma dirençleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu

Laboratuvar deneylerinde Sugözü Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül (UK) ve Kayseri Çimsa firmasından temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de ve uçucu kül ile yüksek fırın cürufu görünümü Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sugözü uçucu külü ile yüksek fırın cürufu kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂ (%)	56,22	39,40
Al ₂ O ₃ (%)	23,17	10,55
Fe ₂ O ₃ (%)	7,12	1,45
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	86,51	-
K ₂ O (%)	2,87	0,77
CaO (%)	2,81	35,21
MgO (%)	1,95	6,91
Na ₂ O (%)	1,85	0,22
TiO ₂ (%)	1,15	0,45
P ₂ O ₅ (%)	0,71	-
SO ₃ (%)	0,47	1,02
Sr (%)	0,21	0,07
BaO (%)	0,15	0,13
MnO (%)	0,12	1,56
ZrO ₂ (%)	0,09	0,05
Cl ⁻ (%)	0,01	0,01
Serbest CaO (%)	0,22	-
Kızdırma Kaybı (%)	1	2,2
Birim Ağırlık (g/cm ³)	2,35	2,85

Yapılan kimyasal analiz sonucuna göre uçucu külün yapısında kütlece SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarının %70'den fazla ve CaO oranının %10'dan az olduğu tespit edildiği için ASTM C618 (ASTM C618, 2012) standardına göre, uçucu külün düşük kireçli F sınıfı uçucu kül olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu görünümü

2.2. Agrega ve Demir Tozu

Yapılan laboratuvar çalışmasında agrega olarak Şekil 2’de görülen 0-4 mm dane çapında ırmak kumu ve Kayseri Sanayi bölgesinden temin edilen 0-4 mm dane çapında atık demir tozu kullanılmıştır.



Şekil 2. Numune üretiminde kullanılan agrega ve atık demir tozu

2.3. Aktivatör

Laboratuvar çalışmasında aktivatör olarak iki farklı aktivatör kullanılmıştır. Uçucu kül ile imal edilen numunelerde aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılırken, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelerde aktivatör olarak sodyum metasilikat kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat görünümü

2.4. Su

DeneySEL çalışmada içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.5. Karışım Oranları ve Deneylerin Tasarımı

Laboratuvar çalışması kapsamında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen harç numunelerde atık demir tozları agrega ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek karışım sistemine dâhil edilmiştir. Karışım sistemine atık demir tozu dâhil edildiğinde taze haldeki harçların TS EN 1015-3 (Taze harç kıvamının tayini) (TS EN 1015-3, 2000) standardına göre yayılma tablası deneyi sonucunda bulunan işlenebilirlik değerleri artmaktadır. Bu nedenle çalışmada sabit işlenebilirlik değerinde çalışmak için atık demir tozu ikamesi ile karışım için kullanılan su miktarında azaltma yapılmıştır. Buna göre uçucu kül ile üretilen numunelerin işlenebilirlik değerleri 130-140 mm arasında, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelerin işlenebilirlik değerleri ise 140-150 mm arasında olacak şekilde ayarlanmıştır. Uçucu kül sistemlerinde aktivatör olarak kullanılan sodyum

hidroksit bağlayıcı malzeme ile ağırlıkça %8, %10 ve %12 oranlarında Na⁺ içerek şekilde kullanılmıştır. 40x40x160 mm³ kalıplara yerleştirilen harç numuneler 75°C ve 100°C sıcaklıklarda 24 ve 48 saat ısıtılı küre tabii tutulmuşlardır. Bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu kullanılan karışım sisteminde ise aktivatör olarak sodyum metasilikat kullanılmıştır. Kullanılan sodyum metasilikat bağlayıcı malzeme ile ağırlıkça %4, %6 ve %8 oranlarında Na⁺ içerek şekilde kullanılmıştır. 40x40x160 mm³ kalıplara yerleştirilen harç numuneler 3, 7, 28 ve 90 gün süreyle oda koşullarında (23°C) hava küreine tabii tutulmuşlardır. Kür işlemini tamamlanan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin birim ağırlık, su emme ve boşluk oranları, eğilme ve basınç dayanımları ile aşınma dirençleri belirlenmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan karışım oranları Tablo 2’de sunulmuştur. Karışım kodlandırılmasında ‘SH’ sodyum hidroksiti, ‘SM’ sodyum metasilikati, ‘U’ uçucu külü, ‘Y’ yüksek fırın cürufunu ve ‘DT’ atık demir tozunu ifade etmektedir. Buna göre 8SH-UDT10 ile kodlandırılan karışım; %8 oranında sodyum hidroksit ve %10 oranında atık demir tozu içeren uçucu kül tabanlı numuneleri temsil etmektedir. Benzer şekilde 4SM-YDT20 ile kodlandırılan karışım; %4 oranında sodyum metasilikat ve %20 oranında atık demir tozu içeren yüksek fırın cürufu numuneleri temsil etmektedir.

Kür işlemini tamamlanan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli harç numunelerin ağırlıkları uçucu kül için 24 ve 48 saat ısıtılı küre süreleri sonrasında, yüksek fırın cürufu için ise 3, 7, 28 ve 90 gün hava küre sonrasında tartılarak bulunmuştur. Elde edilen ağırlıklar her bir numune için kumpas ile ölçülen geometrik boyutlarına bölünmüştür. Bu şekilde yaklaşık olarak sertleşmiş numunelerin birim ağırlıkları tespit edilmiştir.

Her bir karışım için kür işlemini tamamlanan 40×40×160 mm³ boyutlarındaki sertleşmiş numunelere TS EN 1015-11 (TS EN 1015-11, 2000) standardına uygun olarak eğilme deneyi yapılmıştır. Deney görünümü Şekil 4’te sunulmuştur. Deneyde bilgisayar kontrollü 50 N/s yükleme hızı kullanılmıştır. Eğilme deneyi her bir karışım için üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak eğilme deneyi sonucu bulunmuştur. Basınç dayanımı deneyi eğilme deneyi sonucu ikiye bölünen numunelerin düzgün yüzeylerinde TS EN 1015-11 (TS EN 1015-11, 2000) standardında uygun olarak Şekil 4’te görüldüğü şekilde yapılmıştır. Deneyde 500 N/s yükleme hızı kullanılmıştır. Her bir karışım serisi için altı adet numune üzerinde basınç deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması deney sonucu olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Karışım oranları

Numune İsmi	UK	YFC	Kum	Atık Demir Tozu	Na ⁺	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Su	Isıl Kür Sıcaklığı	Kür Süresi	
	g	g	g	g	%	g	g	g	°C	saat	gün
8SH-UDT0	450	-	1350	0	8	62,6	-	157,5	75-100	24-48	-
8SH-UDT10	450	-	1215	135	8	62,6	-	153,5	75-100	24-48	-
8SH-UDT20	450	-	1080	270	8	62,6	-	149,5	75-100	24-48	-

8SH-UDT30	450	-	945	405	8	62,6	-	145,5	75-100	24-48	-
10SH-UDT0	450	-	1350	0	10	78,3	-	157,5	75-100	24-48	-
10SH-UDT10	450	-	1215	135	10	78,3	-	152,5	75-100	24-48	-
10SH-UDT20	450	-	1080	270	10	78,3	-	147,5	75-100	24-48	-
10SH-UDT30	450	-	945	405	10	78,3	-	142,5	75-100	24-48	-
12SH-UDT0	450	-	1350	0	12	93,9	-	157,5	75-100	24-48	-
12SH-UDT10	450	-	1215	135	12	93,9	-	151,5	75-100	24-48	-
12SH-UDT20	450	-	1080	270	12	93,9	-	145,5	75-100	24-48	-
12SH-UDT30	450	-	945	405	12	93,9	-	139,5	75-100	24-48	-
4SM-YDT0	-	450	1350	0	4	-	47,8	225	23	-	3-7-28-90
4SM-YDT10	-	450	1215	135	4	-	47,8	223	23	-	3-7-28-90
4SM-YDT20	-	450	1080	270	4	-	47,8	221	23	-	3-7-28-90
4SM-YDT30	-	450	945	405	4	-	47,8	219	23	-	3-7-28-90
6SM-YDT0	-	450	1350	0	6	-	71,6	225	23	-	3-7-28-90
6SM-YDT10	-	450	1215	135	6	-	71,6	222	23	-	3-7-28-90
6SM-YDT20	-	450	1080	270	6	-	71,6	219	23	-	3-7-28-90
6SM-YDT30	-	450	945	405	6	-	71,6	216	23	-	3-7-28-90
8SM-YDT0	-	450	1350	0	8	-	95,5	225	23	-	3-7-28-90
8SM-YDT10	-	450	1215	135	8	-	95,5	221	23	-	3-7-28-90
8SM-YDT20	-	450	1080	270	8	-	95,5	217	23	-	3-7-28-90
8SM-YDT30	-	450	945	405	8	-	95,5	213	23	-	3-7-28-90



Şekil 4. Eğilme ve basınç deneyi cihazı ve deney görüntüleri

Su emme ve boşluk oranlarının tespit edilmesinde Arşimet yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre su emme ve boşluk oranları aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = \frac{(A_{KYD} - A_{FK})}{(A_{KYD} - A_{SU})} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{FK}} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

A_{FK} : Fırın kurusu ağırlığı (g)

A_{KYD} : Kuru yüzey doymun ağırlığı (g)

A_{SU} : Su içindeki ağırlığı (g)

Aşınma deneyi TS 2824 EN 1338 (TS 2824 EN 1338, 2005) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde $71 \times 71 \times 71 \text{ mm}^3$ boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları ve geometrik ölçüleri belirlenmiştir. Deney Şekil 5'te gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile numunelerin aşınma sonrası hacim kayıpları aşağıdaki denklem ile her 5000 mm^2 'de en yakın 1000 mm^3 tam sayıya yuvarlatılarak hesaplanmıştır.

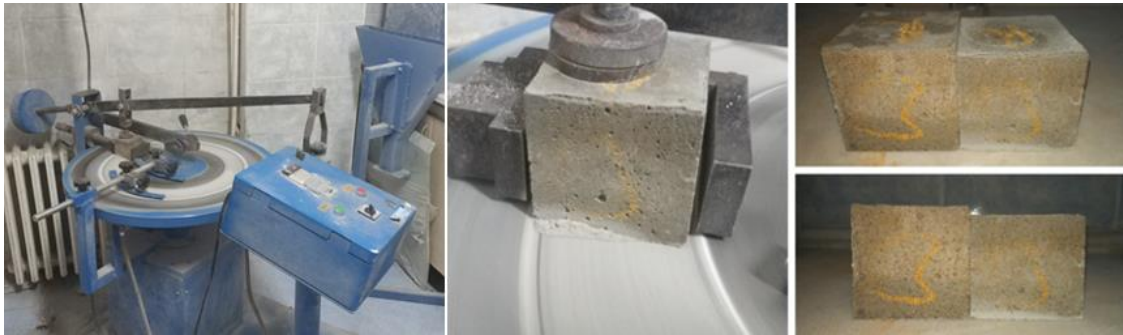
$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r} \quad (3)$$

Burada;

ΔV : 16 çevrimden sonra hacim kaybı, mm^3

Δm : 16 çevrimden sonra kütle kaybı, g,

ρr : Numunenin yoğunluğu, g/mm^3



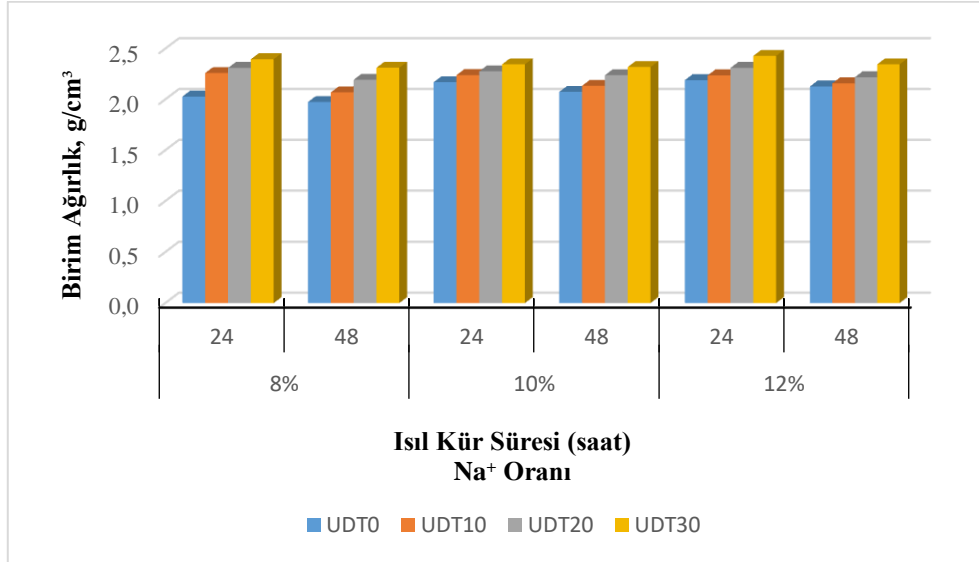
Şekil 5. Aşınma direnci deneyi görünümü

3. Deneysel çalışmalar ve bulgular

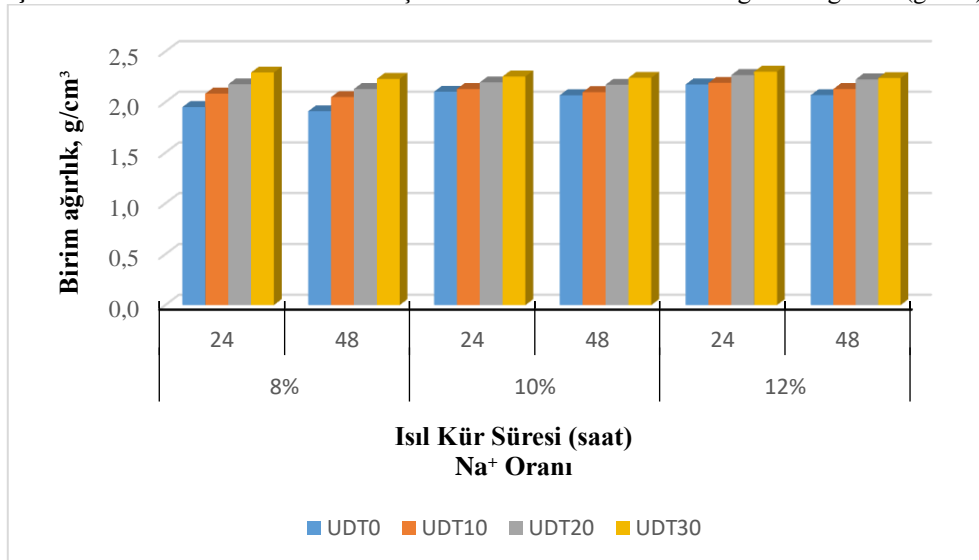
3.1. Birim Ağırlık Deneyi

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen birim ağırlık değerleri uçucu kül ile üretilen harç numuneler için Şekil 6 ve 7'de, yüksek fırın cürufu ile üretilen numuneler için ise Şekil 8'de sunulmuştur.

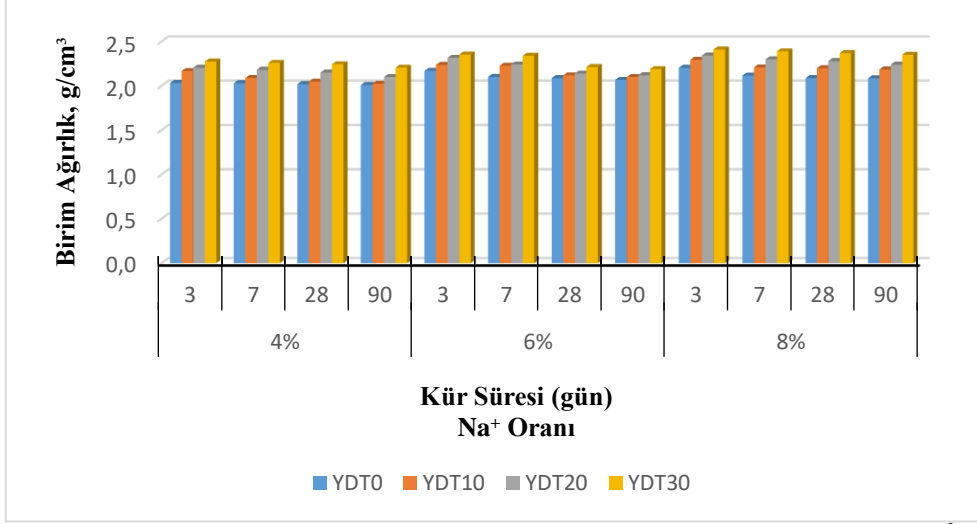
Uçucu kül ile üretilen numunelerde birim ağırlık değerleri $1,91-2,31 \text{ g/cm}^3$ aralığında ölçülürken, yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerde $2,01-2,39 \text{ g/cm}^3$ aralığında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre atık demir tozu ikamesi ile her iki karışım serisinde de birim ağırlık değerleri artmıştır. Bu durum kum ile yer değiştirilen atık demir tozlarının birim ağırlık değerlerinin kuma kıyasla daha yüksek olması ile açıklanmaktadır. En yüksek birim ağırlık değerleri %30 oranında atık demir tozu ikame edilen numunelerde elde edilmiştir. Kullanılan aktivatör miktarı numunelerin birim ağırlık değerlerinde kayda değer bir farklılık oluşturmamıştır.



Şekil 6. 75°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin birim ağırlık değerleri (g/cm^3)



Şekil 7. 100°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin birim ağırlık değerleri (g/cm^3)

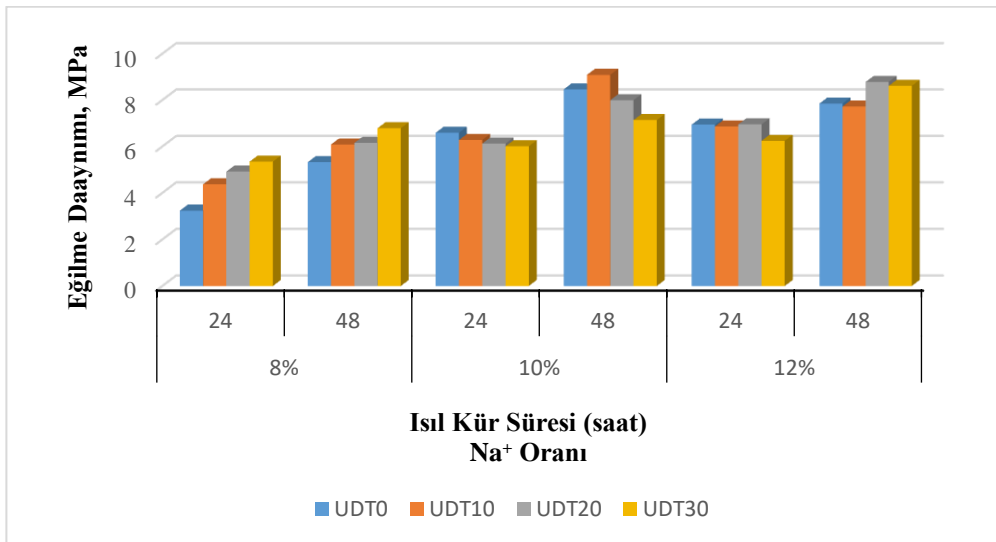


Şekil 8. Oda sıcaklığında kür edilen YFC numunelerinin birim ağırlık değerleri (g/cm^3)

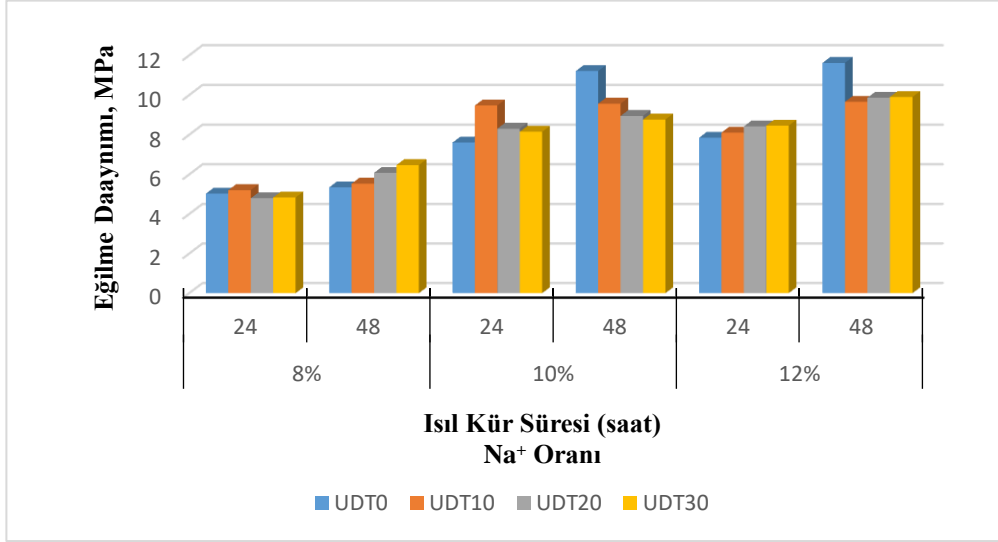
3.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

75°C ve 100°C sıcaklıklarda 24 ve 48 saat kür edilen uçucu kül temelli harç numunelere ait eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 9 ve 10'da sunulmuştur. Oda sıcaklığında 3, 7, 28 ve 90 gün kür edilen yüksek fırın cürufu temelli harç numunelere ait eğilme dayanımı deney sonuçları ise Şekil 11'de sunulmuştur.

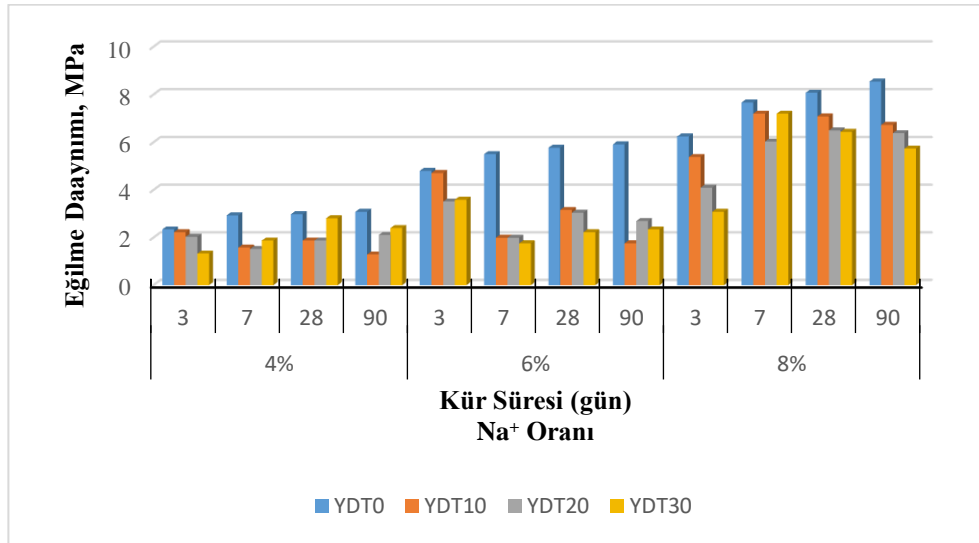
Elde edilen sonuçlara göre artan ısıl kür süresi ve aktivatör oranı ile uçucu kül temelli geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımlarının arttığı gözlenmiştir (Atış ve ark., 2015; Atabey ve ark., 2020; Durak ve ark., 2020). Atık demir tozu ikamesi ile %8 sodyum içeren numunelerde 75°C ısıl kür süresi sonunda numunelerin eğilme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 75°C sıcaklıkta kür edilen numunelerde %10 ve %12 sodyum oranlarında atık demir tozu eğilme dayanımında ciddi bir artış sağlamamıştır. 100°C sıcaklıkta kür edilen numunelerde ise genel olarak atık demir tozu ilavesi ile eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış görülmemiştir.



Şekil 9. 75°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)



Şekil 10. 100°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)



Şekil 11. Oda sıcaklığında kür edilen YFC numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)

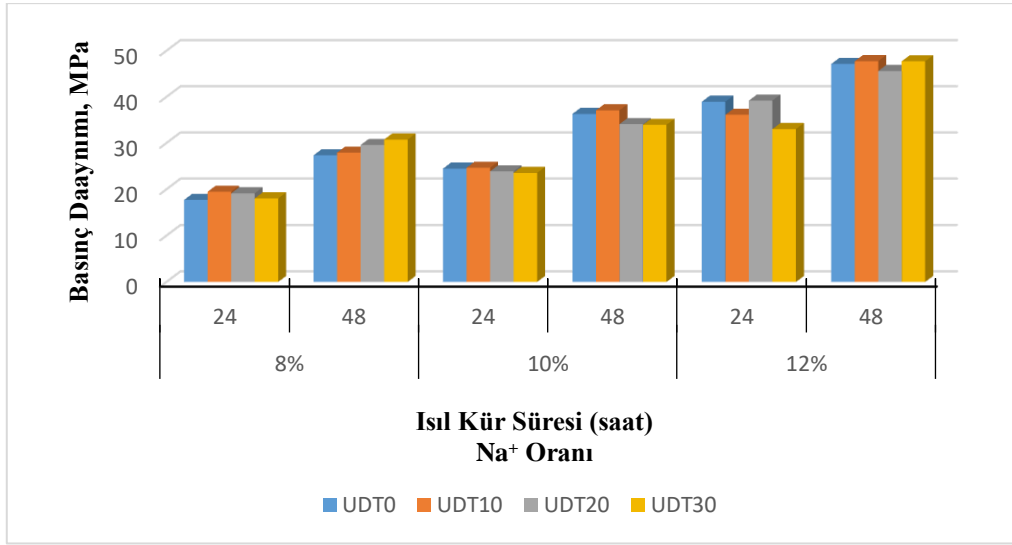
YFC temelli numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde artan kür süresi ve metasilikat miktarı ile numunelerin eğilme dayanımlarında artış meydana geldiği gözlenmektedir (Bingöl, 2018; Almaz, 2020). Tüm sodyum oranları ve kür günlerinde atık demir tozu ilavesi ile numunelerin eğilme dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Eğilme dayanımlarında meydana gelen azalma, atık demir tozu kullanımının artması ile artış göstermiştir.

3.3. Basınç Dayanım Deneyi

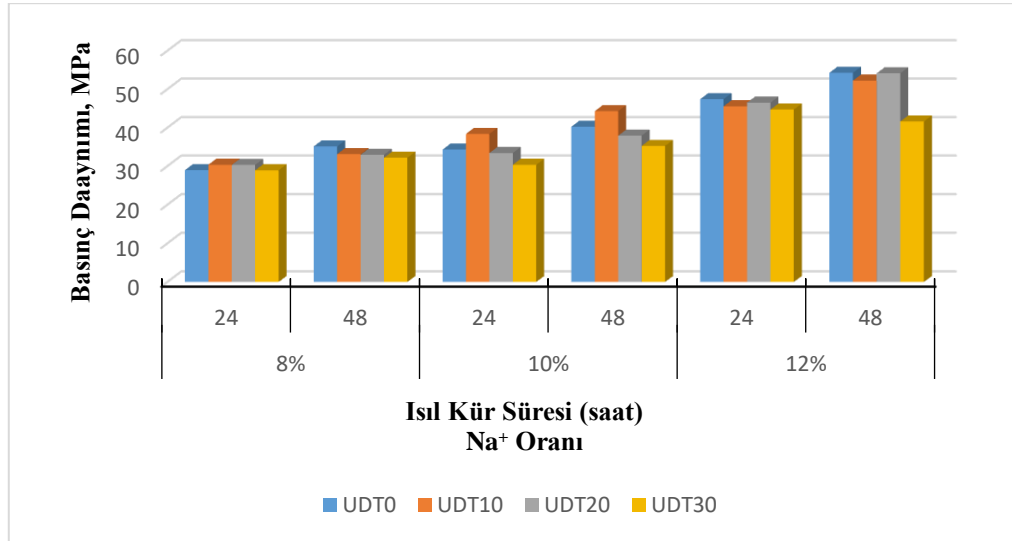
75°C ve 100°C sıcaklıklarda 24 ve 48 saat kür edilen uçucu kül temelli harç numunelere ait basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 12 ve 13'te, oda sıcaklığında 3, 7, 28 ve 90 gün kür edilen yüksek fırın cürufu temelli harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları ise Şekil 14'te sunulmuştur.

Uçucu kül temelli numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde artan ısı kür süresi ve sodyum oranı ile numunelerin basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir (Luga, 2016; Atabey, 2017;

Durak, 2019). 75°C sıcaklıkta kür edilen ve %8 oranında sodyum içeren numunelerde, 24 saat ısıtılma süresi sonunda, atık demir tozu ikamesi ile referans numunelere hemen hemen eşdeğer basınç dayanımları elde edilirken, 48 saat ısıtılma süresi sonunda ise referans numunelerden %10'a varan oranlarda daha fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. 75 °C sıcaklıkta kür edilen ve %10 ile %12 oranlarında sodyum içeren numunelerde ise 24 ve 48 saat ısıtılma süresi sonunda atık demir tozu ikamesi basınç dayanımlarında kayda değer bir değişiklik oluşturmamıştır. 100 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde ise 24 saat ısıtılma süresi sonunda atık demir tozu ikamesi genel olarak basınç dayanımında ciddi bir farklılık oluşturmazken, 48 saat ısıtılma süresi sonunda ise basınç dayanımlarının daha düşük olmasına sebep olmuştur. 75 °C ve 100 °C sıcaklıklarda kür edilen uçucu kül temelli harç numunelerinin basınç dayanımları incelendiğinde %10 atık demir tozu ikamesinin hem 24 hem de 48 saat ısıtılma süresi sonunda özellikle %8 ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde basınç dayanımlarını artırdığı belirlenmiştir.

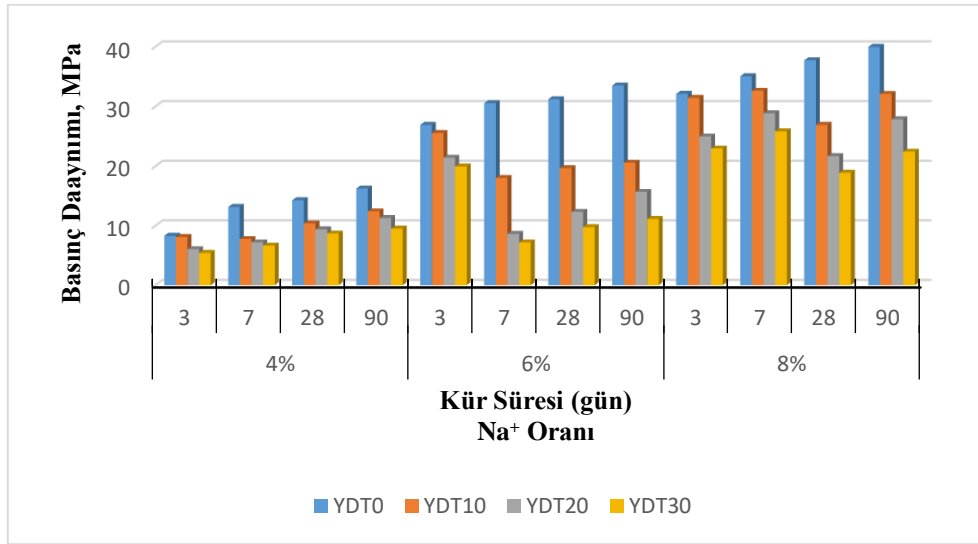


Şekil 12. 75°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin basınç dayanımları (MPa)



Şekil 13. 100°C sıcaklıkta kür edilen uçucu kül numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Yüksek fırın cürufu temelli harç numunelerde artan kür süresi ve aktivatör miktarı ile numunelerin basınç dayanımları artmıştır (Erion Luga, 2016; Almaz, 2020; Bingöl ve ark., 2020). 90 gün kür süresi sonunda %8 oranında sodyum içeren numunelerde 40 MPa basınç dayanımlarına erişilebilmiştir. Atık demir tozu ilavesi ise yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen ve sodyum metasilikat ile aktive edilen harç numunelerde tüm yaşlarda basınç dayanımının düşmesine neden olmuştur. Bu durumun atık demir tozları ile kullanılan aktivatör olan sodyum metasilikat arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan atık demir tozu kullanımı ile basınç dayanımlarında meydana gelen kayıplarda artış gözlenmiştir. Bu nedenle atık demir tozlarının sodyum metasilikat kullanılarak üretilen YFC sistemleri ile uyumlu olmadığı söylenilebilir.



Şekil 14. Oda sıcaklığında kür edilen YFC numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

3.4. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımları sonucunda atık demir tozu ikamesi ile en iyi sonucu veren numuneler üzerinde su emme ve boşluk oranları belirlenmiştir. Bu nedenle uçucu kül ile üretilen numunelerde su emme ve boşluk oranı 100 °C'de 24 saat kür edilen ve %10 oranında sodyum içeren numunelerde belirlenirken, yüksek fırın cürufu numunelerde 28 gün oda sıcaklığında kür edilen ve %8 oranında sodyum metasilikat içeren numunelerde belirlenmiştir. Elde edilen su emme ve boşluk oranları Tablo 3'te sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül ile üretilen numunelerde atık demir tozu ikamesi ile su emme ve boşluk oranlarının az da olsa düşme gözlenmiştir. Artan demir tozu ikamesi ile uçucu kül temelli numunelerde daha düşük su emme ve boşluk oranları elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerde ise artan atık demir tozu ikamesi ile su emme ve boşluk oranlarında artış gözlenmiştir. Yüksek fırın cürufu sistemlerinde atık demir tozu ikamesi ile daha düşük dayanım sonuçlarının bulunması, su emme ve boşluk oranı deney sonucunda ortaya çıkan boşluk miktarının fazla olması ile de açıklanabilmektedir. Bu anlamda YFC sistemlerinde dayanım ve su emme boşluk oranı deney sonuçlarının birbirini desteklediği söylenebilir.

Tablo 3. 1 Uçucu kül ve YFC numuneleri su emme ve boşluk oranı deney sonuçları (%)

Uçucu Kül		Yüksek Fırın Cürufu		
Kür Şekli	100°C-Isıl kür	23°C-Hava kürü		
Kür Süresi	24 saat	28 gün		
Na⁺ Oranı	% 10	% 8		
Numune Kodu	Su Emme	Boşluk	Su Emme	Boşluk
	Oranı (%)	Oranı (%)	Oranı (%)	Oranı (%)
DT0	6,5	13,0	6,5	13,8
DT10	6,5	13,1	6,8	14,8
DT20	6,2	12,9	7,2	16,0
DT30	6,1	12,8	7,8	17,3

3.5. Aşınma Direnci Deneyi

Aşınma direnci deneyi eğilme ve basınç deneyleri sonrasında atık demir tozu ikamesi ile en iyi sonucu veren numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aşınma direnci, uçucu kül ile üretilen numunelerde 100°C’de 24 saat kür edilen ve %10 oranında sodyum hidroksit içeren numunelerde belirlenirken, yüksek fırın cürufu numunelerde 28 gün oda sıcaklığında kür edilen ve %8 oranında sodyum metasilikat içeren numunelerde belirlenmiştir. Elde edilen ağırlık ve hacim kayıpları Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4. Aşınma direnci deney sonuçları

Uçucu Kül		Yüksek Fırın Cürufu		
Kür Şekli	100°C-Isıl kür	23°C-Hava kürü		
Kür Süresi	24 saat	28 gün		
Na⁺ Oranı	% 10	% 8		
Numune Kodu	Ağırlık Kaybı	Hacim Kaybı	Ağırlık Kaybı	Hacim Kaybı
	(g)	(mm³/5000mm²)	(g)	(mm³/5000mm²)
DT0	34,9	17000	42,4	19000
DT10	29,0	15000	35,0	16000
DT20	26,4	13000	31,3	13000
DT30	25,3	12000	28,9	13000

Elde edilen sonuçlara göre hem uçucu kül hem de yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelerde agrega ile atık demir tozunun ikame edilmesi sonucu elde edilen harç numunelerin

aşınma direncinde artış gözlenmiştir. Artan atık demir tozu ikamesi ile harç numunelerde her iki karışım sisteminde de aşınma dirençleri artmıştır. Uçucu kül ile üretilen numunelerde aşınma deneyi sonunda %10, %20 ve %30 atık demir tozu ikamesinde sırasıyla %17, %25 ve %28'e varan oranlarda daha az ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerde ise aşınma deneyi sonunda %10, %20 ve %30 atık demir tozu ikamesinde sırasıyla %17, %26 ve %32'ye varan oranlarda daha az ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

4. Sonuçlar

1- Atık demir tozu kullanımı ile hem uçucu kül hem de yüksek fırın cürufu ile üretilen harç numunelerin birim ağırlık değerleri artmıştır. Birim ağırlık değerlerinde meydana gelen artış, atık demir tozu kullanımının artışı ile daha fazla olmuştur.

2- Atık demir tozu kullanımı ile eğilme ve basınç dayanımları uçucu kül ile üretilen harç numunelerde 75°C ve 100°C sıcaklıklarda %8 ve %10 sodyum içeren numunelerde artarken, yüksek fırın cürufu ile üretilen harç numunelerde tüm kür sürelerinde ve aktivatör oranlarında düşmüştür.

3- Atık demir tozu ikamesi uçucu kül ile üretilen numunelerde su emme ve boşluk oranlarında kayda değer bir etki oluşturmazken, yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerde su emme ve boşluk oranlarının artmasına neden olmuştur.

4- Atık demir tozu ikamesi ile aşınma direncinde uçucu kül ile üretilen numunelerde %28, yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerde ise %32'ye varan oranlarda iyileşme meydana gelmiştir.

5- Elde edilen sonuçlar; atık demir tozu kullanımının yüksek fırın cürufu sistemlerinde genel olarak olumlu sonuçlar vermediği, uçucu kül ile üretilen sistemlerde ise aşınma ve basınç dayanımında olumlu sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

6- Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular ile çimento sistemlerinde atık demir tozunun agrega ile ikame edilerek kullanılması sonucunda elde edilebilen olumlu katkıların, geopolimer sistemlerde elde edilemediği kanaatine varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

Kaynakça

- Almaz ZÖ. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı harçların özellikleri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2020.
- ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use. American Society for Testing and Material, 2012.
- Atabey İİ. F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017.
- Atabey İ., Karahan O., Bilim C., Atiş CD. Very high strength Na₂SiO₃ and NaOH activated fly ash based geopolimer mortar. Cement, Wapno, Beton 2020; 2020(4): 292–305.
- Atiş CD., Görür EB., Karahan O., Bilim C., İlkentapar S., Luga E. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolimer mortar activated at different naoh amount, heat curing temperature and heat curing duration.” Construction and Building Materials 2015; 96: 673–678.
- Aydın S. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2010.
- Bingöl Ş. Investigation of mechanical and durability properties of alkali activated blast furnace slag mortars. Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, 2018.
- Bingöl Ş., Bilim C., Atiş CD., Durak U. Durability properties of geopolimer mortars containing slag. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 2020; 44(S1).
- Binici H., Sevinç A., Geçkil H. Atık demir tozu katkılı harç ve betonların durabilite özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2015; 30(June): 1–16.
- BS EN 450-1: 2012. Fly ash for concrete, Part 1: Definition, Specifications and Conformity Criteria. British Standard.
- Durak U., Karahan O., Uzal B., İlkentapar S., Atiş CD. Influence of Nano SiO₂ and Nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolimer. Structural Concrete 2021; 22(Suppl.1): E352–E367.
- Durak U., İlkentapar S., Karahan O., Uzal B., Atis CD. A new parameter influencing the reaction kinetics and properties of fly ash based geopolimers: A pre-rest period before heat curing. Journal of Building Engineering 2021; 35: 102023.
- Durak U. Nanoparçacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2019.
- Erdoğan T. Beton. 5th ed. Ankara, Turkey: Odtü Yayıncılık, 2015.
- Erion L., Atiş CD. Strength properties of slag/fly ash blends activated with sodium metasilicate and sodium hydroxide+silica fume. Periodica Polytechnica Civil Engineering 2016; 60(2): 223–228.
- Ghannam S., Najm H., Vasconez R. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. Sustainable Materials and Technologies 2016; 9: 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.001>.

- Kaya M., Yılmaz M., Karahan O., Atış CD. Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars. *Gradevinar* 2020; 72(04): 297-309.
- Kim JJ., Heo YS., Noguchi T. Effect of iron powder on inhibition of carbonation process in cementitious materials. *ISIJ International* 2015; 55(7): 1522-1530.
- Neville AM. *Longman Properties of Concrete*. 4th ed. London: Longman, 1995.
- Özodabaş A. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların performansının geliştirilmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2014.
- Provis JL. Green concrete or red herring? - Future of alkali-activated materials. In *Advances in Applied Ceramics*, 2014.
- Provis John L., Jannie SJ Van Deventer. *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications* geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, 2009.
- Şimşek O. *Beton ve Beton Teknolojisi*. Ankara, Turkey: Seçkin Yayıncılık, 2004.
- Taş HH., Çoban Ö., Topbaşlı B. Endüstriyel demir talaşı atığının betonun bazı mekanik özelliklerine etkisi. *Constructional Technologies* 2013; 5(1): 1–11.
- TS 2824 EN 1338. *Concrete paving blocks-requirements and test methods*. Ankara, Turkey, 2005.
- TS EN 1015-11. *Mortar testing method, Part 11. Measurement of Compressive and Flexural Tensile Strength of Mortar*. Ankara, Turkey: TSE, 2000.
- TS EN 1015-3. *Methods of Test for Mortar for Masonry: Part 3. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*. Ankara, Turkey: TSE, 2000.
- Yurt Ü., Dündar B., Çınar E. Jeopolimer betonlarda sülfürik asit etkisinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2020; 8: 1548-1561.