



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN UÇUCU KÜL BAZLI
GEOPOLİMER TUĞLA ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR / 2023



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN UÇUCU KÜL BAZLI
GEOPOLİMER TUĞLA ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR**

KIRŞEHİR / 2023

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim adamının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim.

Tezi yazma sürecimde sorularıma verdikleri cevap ile bana destek olan Dr. Öğretim Üyesi Arzu ÇAĞLAR'a teşekkür ederim.

Tezimi, eşim, çocuklarım, annem ve babama ithaf ederim.

Mart, 2023

HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Fırın Cürufu	2
2.1.1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri	5
2.1.2. Yüksek fırın cürufunun kullanım alanları	6
1.2. Uçucu Kül	6
2.1.1. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri	8
2.1.2. Uçucu külün sınıflandırılması	11
2.1.3. Uçucu külün kullanım alanları	13
1.3. Tuğla.....	14
3.1.1. Tuğlanın tarihçesi	15
3.1.2. Tuğla üretimi	16
3.1.3. Tuğla çeşitleri	19
1.4. Geopolimer Tuğla.....	20
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1. Materyal	26
3.1.1. Killi Toprak.....	26
3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	26
3.1.3. Uçucu Kül.....	27
3.1.4. Sodyum Hidroksit.....	27
3.1.5. Kalsiyum Hidroksit.....	28
3.1.6. Karışım Suyu.....	29
3.2. Yöntem	29
3.2.1. Geopolimer tuğla numunelerinin üretimi	29

3.2.2. Geopolimer tuğla numunelerine uygulanan fiziksel deneyler	34
3.2.3. Geopolimer tuğla numunelerine uygulanan mekanik deneyler	35
3.2.4. Geopolimer tuğla numunelerinin mikro yapısının incelenmesi.....	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	38
4.1. Birim Hacim Ağırlık	38
4.2. Su Emme (Ağırlıkça).....	39
4.3. Isı İletim Katsayısı Tayini	39
4.4. Basınç Dayanımı	40
4.5. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	41
4.6. SEM Görüntülerinin Analizi	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Yüksek fırın cürufunun üretim akışı.....	3
Şekil 1.2. Granülasyon yönteminin şematik olarak gösterimi.....	4
Şekil 1.3. Paletleme yönteminin şematik gösterimi	5
Şekil 1.4. Uçucu kül.....	7
Şekil 1.5. Kül ve uçucu kül oluşumunu gösteren bir enerji tesisi akım şeması....	8
Şekil 1.6. C sınıfı uçucu kül SEM görüntüsü	12
Şekil 1.7. F sınıfı uçucu kül SEM görüntüsü	12
Şekil 1.8. Tuğla yapı malzemesi	15
Şekil 1.9. Tuğla üretim aşamaları	16
Şekil 1.10. Killi toprağın ocaktan çıkarılması	16
Şekil 1.11. Killi toprağın eleme işlemi	17
Şekil 1.12. Kaldırım tuğlası.....	20
Şekil 1.13. İnce tuğla.....	20
Şekil 3.1. Sodyum hidroksit.....	28
Şekil 3.2. Kalsiyum hidroksit.....	29
Şekil 3.3. Geopolimer tuğla üretim şeması.....	31
Şekil 3.4. Numune kalıpları.....	32
Şekil 3.5. Tuğlaların pişirilmesi.....	33
Şekil 3.6. Geopolimer tuğla numuneleri.....	33
Şekil 3.7. Isı iletim katsayısı tayini deney düzeneği.....	35
Şekil 3.8. Basınç dayanım düzeneği.....	36
Şekil 3.9. SEM cihazı.....	37

Şekil 4.1.	Birim hacim ağırlık değerleri grafiği	38
Şekil 4.2.	Su emme değerleri grafiği	39
Şekil 4.3.	Isı iletim katsayısı tayini deney sonuçları	40
Şekil 4.4.	Basınç dayanımı değerleri grafiği	41
Şekil 4.5.	Eğilmeye çekme dayanımı değerleri grafiği	42
Şekil 4.6.	Referans numunenin SEM görüntüsü	43
Şekil 4.7.	10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu YFC30 numunesinin SEM görüntüsü.....	44



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1.1. Yüksek fırın cüruflarının ülkeler bazında kimyasal bileşenleri	6
Tablo 1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	9
Tablo 1.3. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	10
Tablo 1.4. TS 639'a göre uçucu külün kimyasal özellikleri	10
Tablo 1.5. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimi	11
Tablo 3.1. Geopolimer tuğla üretiminde kullanılan toprağın içinde bulunan elementlerin ağırlık yüzdeleri.....	26
Tablo 3.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimleri	27
Tablo 3.3. Uçucu külün kimyasal bileşimleri	27
Tablo 3.4. Sodyum Hidroksitin kimyasal değerleri	27
Tablo 3.5. Kalsiyum Hidroksitin kimyasal değerleri	28
Tablo 3.6. Karışım reçetesi	30

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C	: Karbon
O	: Oksijen
CO	: Karbon Monoksit
CO₂	: Karbon Dioksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
SiO₂	: Silisyum Oksit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
MnO	: Manganez
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
KOH	: Potasyum Hidroksit

Kısaltmalar	Açıklama
MÖ	: Milattan Önce
vb	: Ve benzeri
mm	: Milimetre
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
µm	: Mikron
TS	: Türk Standartları
ASTM	: American Society for Testing and Materials
V	: Silissi
W	: Kalkersi
MPa	: Megapaskal
GGBS	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
FA	: Uçucu Kül
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN UÇUCU KÜL BAZLI GEOPOLİMER TUĞLA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Hüseyin

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Hakan ÇAĞLAR

Yapı iç ve dış duvarlarında kullanımı yaygın olan tuğla, zaman içerisinde farklı malzemeler ikame edilerek özellikleri iyileştirilmiştir. Bu iyileştirme son zamanlarda daha çok atık malzemelerle yapılmaktadır. Gerek tarımsal atıklar gerekse endüstriyel atıklar tuğla üretiminde önemli girdiler olarak görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Karabük Demir Çelik Fabrikası atığı olan yüksek fırın cürufu ve Seyitömer termik santrali atığı uçucu kül kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimer tuğla üretimi hedeflenmiştir. Çalışmada fiziksel ve mekanik açıdan normal tuğlaya göre üstün özelliklere sahip, termal özellikleri daha iyi bir geopolimer tuğla üretimi amaçlanmıştır.

Tez çalışması üç aşamada tamamlanmıştır. Birinci aşamada, referans numune üretimi yapılmıştır.

İkinci aşamada yüksek fırın cürufu katkılı (%10, %30, %50 ve %70), 8 - 10 M sodyum hidroksit ve %4 - %8 oranında kalsiyum hidroksit konsantrasyonlu, uçucu kül bazlı (%10) geopolimer tuğla üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü ve son aşamada ise üretilen numunelere birim hacim ağırlık, su emme (ağırlıkça), ısı iletim katsayısı tayini, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca mikro yapı analizi için numunelerin SEM görüntüsü alınmıştır.

Çalışmada sonuç olarak, Sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit oranının artmasıyla, daha amorf bir yapı oluştuğu, su emme miktarının azaldığı ve basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra atıkların geopolimer tuğla üretiminde kullanılabileceği, bu durumun atık bertarafı için çok uygun bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

MART 2023, 67 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Geopolimer tuğla, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BLAST FURNACE SLAG ON THE PROPERTIES OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER BRICK

HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI

**Kırsehir Ahi Evran University
Graduate School of Sciences and Engineering
Advanced Technologies Department**

Supervisor: Assist. Dr. Hakan ÇAĞLAR

Brick, which is widely used in the interior and exterior walls of buildings, has improved its properties by substituting different materials over time. This improvement has been made more recently with waste materials. Both agricultural wastes and industrial wastes are seen as important inputs in brick production.

In this thesis, it is aimed to produce fly ash based geopolymer bricks by using blast furnace slag, which is the waste of Karabük Iron and Steel Factory, and fly ash from Seyitömer thermal power plant. In the study, it was aimed to produce a geopolymer brick with superior physical and mechanical properties compared to normal bricks and better thermal properties.

The thesis study was completed in three stages. In the first stage, reference sample was produced.

In the second stage, geopolymer bricks containing blast furnace slag (10%, 30%, 50% and 70%), 8 - 10 M sodium hydroxide and 4% - 8% calcium hydroxide concentration, fly ash based (10%) geopolymer bricks were produced.

In the third and last stage, unit volume weight, water absorption (by weight), determination of heat transmission coefficient, compressive strength and tensile strength in bending tests were applied to the produced samples. In addition, SEM images of the samples were taken for microstructure analysis.

As a result of the study, it was observed that with the increase of sodium hydroxide and calcium hydroxide ratio, a more amorphous structure was formed, the amount of water absorption decreased and the compressive strength increased. In addition, it has been determined that the waste can be used in the production of geopolymer bricks, which is a very suitable method for waste disposal.

March 2023, 67 Pages

Keywords: Geopolymer brick, blast furnace slag, fly ash, sodium hydroxide, calcium hydroxide

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün en önemli unsurlarından biri olan tuğla [1] ve üretimi MÖ 8000'den günümüze kadar uzanan en eski endüstrilerden biridir [2,3]. Tuğla, kilin fırında yakılmasından sonra elde edilen yanmış bir bloktur [4]. Teknolojideki gelişmelere rağmen, dünya nüfusunun yarısından fazlası hala taşıyıcı yapılarını, pişirilerek tuğla haline getirilen kilden inşa etmektedir. Genellikle yapılarda dış ve iç duvarların yapımında kullanılan büyük ölçekli bir yapı malzemesidir [5]. Ayrıca dünyanın birçok yerinde alçak ve orta katlı bina inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3].

Son zamanlarda kentleşme ve nüfus artışındaki hızlı artış nedeniyle bu malzemelerin kullanımı artmıştır. Nüfus artışı, inşaat sektörü ve yapı malzemelerine olan talep artışı üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır [6].

Maliyet düşürme, enerji tasarrufu ve muhtemelen daha iyi ürünler nedeniyle literatürde yapı malzemeleri üretmek için sıklıkla atık malzemeler kullanılmaktadır [6,7,8].

Tez kullanılan atık malzemelerden biri yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufu, demir çelik fabrikalarının fırınlarda kok, demir filizi gangü vb. malzemelerin 1400-1600 °C arasındaki sıcaklıklarda demir imalatının ardından ergimiş şekilde meydana gelmektedir. Yüksek fırın cürufu, ana maddenin tipi ve imalat yöntemine göre farklı özelliklere sahip olabilmektedir [9,10,11]. Genellikle çimento ve beton üretiminde kullanılan bu atık [12], tuğla üretimine de katılmaya başlanmıştır [13].

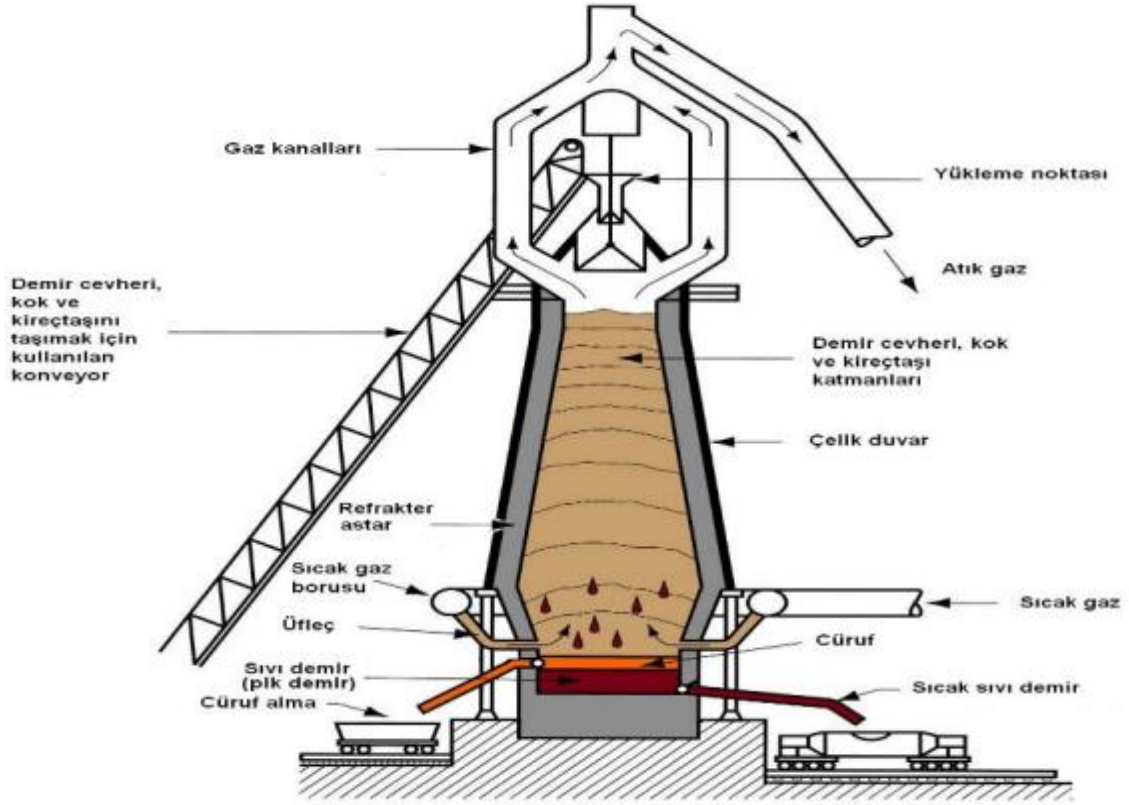
Bir diğer atık ise uçucu küldür. Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan puzolanik özelliğe sahip atıktır.

2020 yılında ülkemizde 100 MW ve üzeri tüm termik santrallerde toplamda, 24.400.000 ton uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bunun 10.000 tonu tehlikeli diye nitelendirilmektedir. Tehlike arz etmeyen atığın % 79,5'ini kül ve cüruf atıkları, % 20,5'i metal, kâğıt, vb atıklarıdır. Atıkların % 85,9'u kül barajlarına ya da depolama alanlarında imha edilmekte, % 13,2'si lisansı bulunan yirmi üç tesise gönderilmiştir. Geri gönderilen atıklar taş ya da maden ocaklarında geri doldurma işleminde kullanılmıştır. Kalan % 0,9'luk kısmı ise farklı yollarla imha edilmiştir [14].

Bu tez çalışmasında, Karabük Demir Çelik Fabrikası atığı olan yüksek fırın cürufu ve Seyitömer termik santrali atığı uçucu kül kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimer tuğla üretimi hedeflenmiştir. Çalışmada fiziksel ve mekanik açıdan normal tuğlaya göre üstün özelliklere sahip, termal özellikleri daha iyi bir geopolimer tuğla üretimi amaçlanmıştır.

1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Demir çelik üretim tesislerinde demir üretebilmek için saf halde ocaktan çıkarılan demir, yüksek fırın diye adlandırılan fırınlarda 1400-1600 °C'de ısıtılmaktadır [15]. Yüksek sıcaklıklarda demir madenini diğer yabancı maddelerden arındırma işleminde yakıt olarak kok kömürü, katelizör olarakta kalker taşı kullanılmaktadır [16]. Yüksek sıcaklık altında kömürde bulunan karbon (C) ve demir oksitte bulunan oksijen (O) birleşerek CO ve CO₂ gazlarını meydana getirmektedir. Gazlar fırından dışarı atıldığında fırın içerisinde eriyik halde CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO ve S vb. yabancı maddeler kalmaktadır. Demirin yoğunluğunun bu yabancı maddelerin yoğunluğundan fazla olması sebebiyle demir alt tabana inmekte, yabancı maddeler ise eriyik şekilde üste çıkmaktadır. Daha sonra yabancı maddeler ve eriyik haldeki demir farklı kollardan fırını terk etmektedir. Fırından çıkan bu yabancı maddelerin soğuması için bir süre beklenmektedir. Soğuduktan sonra boyutları 2-5 mm arasında değişen, kuma benzeyen bir görüntüye sahip bu atıklara yüksek fırın cürufu denilmektedir [17,18]. Şekil 1.1'de yüksek fırın cürufunun oluşma süreci sunulmuştur [19]. Yüksek fırın cürufunun soğutulması için bir miktar beklenmektedir.



Şekil 1.1. Yüksek fırın cürufunun üretim akışı [20]

Yüksek fırın cürufunun yavaş bir şekilde soğuması durumunda cüruf kristal bir yapıda olmaktadır. Bu özelliğinden dolayı inşaat alanında beton agregası olarak kullanımı yaygındır.

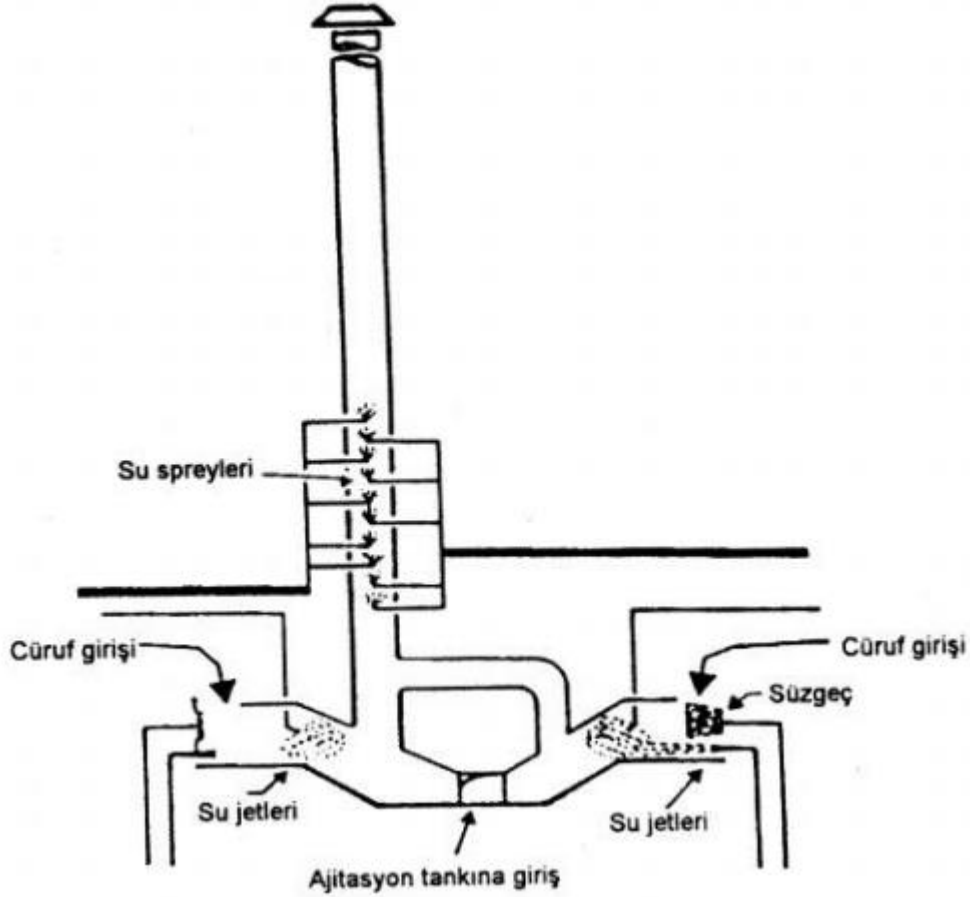
Yüksek fırın cürufunun ani bir şekilde soğuması cüruf kristal yapıya dönüşmeden camı yapıda ve bir miktar hidrolik özellik göstermesine neden olmaktadır. Bu da yüksek fırın cürufuna hem tek başına bağlayıcı olarak kullanılabilme hem de çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilme avantajı vermektedir [21,22].

Yüksek fırın cürufunun hızlı bir şekilde soğutulması iki yöntemle yapılmaktadır. Bunlar;

- Granülasyon yöntemi
- Peletleme yöntemidir.

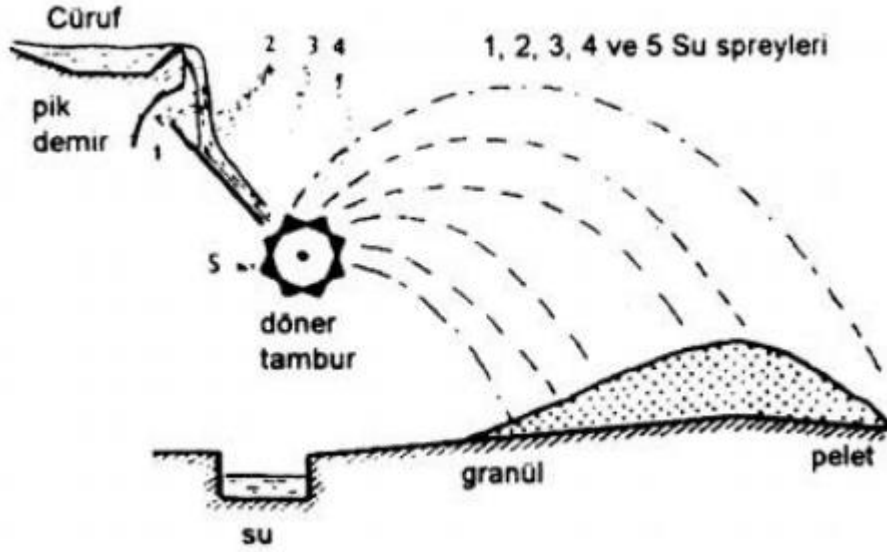
Granülasyon yöntemi; Bu yöntemde, 1 ton YFC'nun soğutulması amacıyla 100 m³ su harcanmaktadır. Granülasyon yöntemi sonucunda üretilen %30 oranında su ihtiva etmektedir. YFC bünyesinde bulunan bu su filtreli havuzlarda ya da kurutucu değirmenlerde kurutularak bünyesinden ayrıştırılmaktadır. Granülasyon yöntemiyle üretilen YFC

özellikleri açısından en iyi özelliklere sahiptir. Fakat yöntemin ekonomik olmaması onun en büyük dezavantajı olmaktadır. Şekil 1.2’de granülasyon yönteminin şematik olarak gösterimi sunulmuştur [23].



Şekil 1.2. Granülasyon Yönteminin Şematik Olarak gösterimi [23].

Peletleme yöntemi; Bu yöntem ekonomik olması ve uygulama kolaylığından dolayı granülasyon yöntemine göre daha yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Yöntemde eriyik şekilde bulunan YFC su ile soğutulduktan sonra 300 Dakika/devir yapan bir tambur ile havaya fırlatılarak kurutulur. 1 ton YFC’nun kurutulması amacıyla $1m^3$ su harcanmaktadır. Uygulama sonrasında cüruf bünyesinde bulunan %10 oranındaki su kurutucu değirmenlerde ya da filtreli havuzlarda bünyeden uzaklaştırılmaktadır. Peletleme yöntemiyle farklı ebatlarda YFC elde etmek mümkündür. Yüksek fırın cürufu 4-15mm arasında ve gözenekli olan YFC kristal yapıda, 4mm’nin altında olan YFC ise camsı yapıdadırlar [24]. Şekil 1.3’de peletleme yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 1.3. Paletleme yönteminin şematik gösterimi [25].

1.1.1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

YFC'nun puzolanik özelliği, hidrolik aktivitesi kimyasal bileşenleri ile ilişkilidir. Cürufun bileşimi, kok beslenmesine, eritme taşına ve hammaddeye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [26]. Genellikle bünyesinde CaO , SiO_2 , MgO ve Al_2O_3 bileşikleri bulunmaktadır. Ayrıca bileşenlerden CaO/SiO_2 oranı yüksek fırın cürufu için oldukça önemlidir. Bu oranın 1'den büyük olması gerekmektedir [17]. Değerin artması cürufun bağlayıcılık özelliğini arttırmaktadır [25]. Lakin sınır değerini üzerine çıkması durumunda bağlayıcılık özelliğinde azalma meydana gelmektedir. Bu oran sabitlenip Al_2O_3 miktarının artmasıyla cürufun aktivitesinde artış meydana gelmektedir.

YFC bünyesinde yer alan CaO ve MgO bileşikleri benzer özellikler göstermektedir. CaO miktarındaki azalma MgO ile takviye edilebilir ama bu ikame dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle cüruf içerisinde bulunan MgO oranı %10'dan az olmalıdır [23]. Tablo 1.1'de Yüksek fırın cürufunun ülkeler bazında kimyasal bileşenleri verilmiştir [27,28].

Tablo 1.1. Yüksek fırın cürüflerinin ülkeler bazında kimyasal bileşenleri

Bileşenler	Yüksek Fırın Cürufu			
	Türkiye	ABD ve Kanada	Avustralya	Güney Afrika
SiO ₂ (%)	34-36	30-40	33-37	30-36
CaO (%)	34-41	29-50	38-44	30-40
Al ₂ O ₃ (%)	13-19	7-18	15-18	9-16
MgO	3.5-7	0-19	1-3	8-21
Fe ₂ O ₃ (%)	0.3-2.5	0.1-1.5	0-0.7	-
MnO	1-2.5	0.2-1.5	0.3-1.5	-
S	1-2	0-2.0	0.6-0.8	1-1.6
SO ₃ (%)	-	-	-	-

1.1.2. Yüksek fırın cürufunun kullanım alanları

Yüksek fırın cürufu, buhar, basınçlı hava veya su etkisiyle soğutulması sonucu hidrolik özellik göstermez fakat genişlerken gözenekli yapı oluştururlar. Bu tür yüksek fırın cürüfları düşük özgül ağırlığa sahiptir. Yüksek fırın cürüfları;

- Beton üretiminde mineral katkı olarak,
- Hafif beton üretiminde agrega olarak,

Betonda çimento ikame malzemesi olarak, Çimento üretim safhasında, çimento içerisinde katılarak kullanılmaktadır [17].

1.2. Uçucu Kül

Uçucu kül, elektrik enerjisi üretmek için kömürle çalışan termik santrallerde kömürün yanması neticesinde oluşan, baca gazları vasıtasıyla sürüklenebilecek kadar ince toz şeklinde, küresel forma ve camsı yapıya sahip bacalarda filtreler yoluyla utulan atık malzemelere denilmektedir [14,29,30,31] (Şekil 1.4).



Şekil 1. 4. Uçucu kül

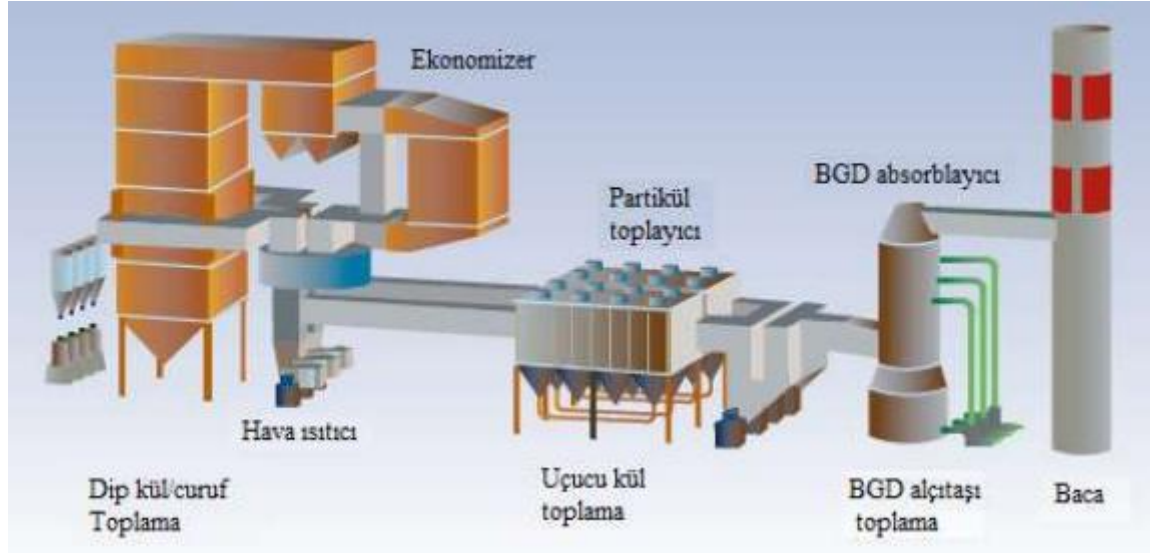
Uçucu kül özellikleri, yakıt olarak tüketilen kömürün cinsine, santral çeşidine, kömürün pulvarizasyon derecesine, santral kazanın özelliğine, yakma sıcaklığına, külün, yakma sırasında kömür ilave edilen ikame malzemelerine göre değişmektedir [32]. Silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit uçucu külü oluşturan ana bileşenlerdir [30,33].

Uçucu kül üretimi; uçucu kül üretimine etkileyen çok sayıda etmenler olsa da yakıt olarak kullanılan taş kömürün %10-15, linyit kömürün ise %20-50'si küle dönüşmektedir [34]. Elde edilen külün %75-85'i baca gazlarıyla kazanı terk etmektedir. Kömürün yanması sırasında ortam sıcaklığı 1600 °C'nin üzerine çıkmaktadır. 1600 °C'de kömür içerisindeki inorganik malzemeler erimektedir. Kömür içerisinde çok sayıda mineral bulunsa da çoğu mineraller çok az ya da eser miktardadır. Kömür içerisinde bulunan ana mineraller 5 guruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Silika mineralleri
- Karbonatlar
- Sülfürler
- Klorürler
- Alüminyum silikatlar

Kömürün yanması sırasında ağır küller (cürufklar) yanma kısmının alt bölmesine düşmektedir. Toplam külün %80'nini oluşturan hafif olan küller ise egzoz gazıyla dışarı atılmaktadır [30]. Böylelikle uçucu kül elde edilmiş olmaktadır. Uçucu kül dışarı çıkmadan

önce torba yuvalar, elektrostatik ya da elektromekanik çöktürücülerle toplanmaktadır [35,36]. Uçucu kül, toplama amacıyla silolara iletilir. Ardından konveyör bantlar yardımıyla santrallerden uzak bir alanlarda bulunan depolarda tutulmaktadır [37]. Şekil 1.5’de uçucu kül üretimini gösteren sistem verilmiştir.



Şekil 1.5. Kül/cüruf ve uçucu kül oluşumunu gösteren tipik bir enerji tesisi akım şeması

Depolar zamanla tesislere problem oluşturmaktadır. Dünya’da yaklaşık 600.000.000 ton uçucu kül meydana gelmektedir [38]. Bu küllerin farklı alanlarda kullanımı üretici ve tüketici yönünden avantaj sağlamaktadır. Bu faydaya rağmen açığa çıkan uçucu külün %15’i kullanılmaktadır [39,30]. Ayrıca uçucu küller toprak, hava ve su kirliliğine neden olarak insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir [40]. Bu yüzden uçucu külün değerlendirilmesi hem insan ve çevre sağlığına hem de ekonomiye katkıda bulunacaktır [29].

Uçucu küller yalnız kullanıldığında herhangi bir bağlayıcılık özellik göstermemektedir. Fakat sönmüş kireçle kullanıldığında hidrasyon tepkimesine girmekte ve su ile sertleşerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [41]. Bu puzolanik özelliği uçucu külü piyasada en çok kullanılan puzolan çeşidi yapmaktadır [37].

1.2.1. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Uçucu küller, 0,2-200 µm boyuta sahip, camsı, küresel, köşeli ve düzensiz taneciklerden meydana gelmiştir. Bu küllerin rengi içerdikleri karbon miktarına göre farklılık göstermektedir. Renk skalası açık bej, gri, kahverengi ve siyah arasındadır. Uçucu külün rengini belirleyen içerisindeki karbon miktarıdır. Karbon miktarının artması uçucu külün renginde koyulaşmaya neden olmaktadır. Şayet uçucu kül tamamen yanmazsa uçucu kül

siyah renk almaktadır [36,42]. Demir içeriğinin fazla olması durumunda ise uçucu kül açık gri renk almaktadır [43]. Uçucu kül fiziksel özellikleri Tablo 1.2’de verilmiştir [14,37,44,45].

Tablo 1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,2-2,7
Spesifik Yüzey cm ² /g	2800-3800
Özgül ağırlık g/cm ³	1,9-2,8
Renk	Gri ve tonları

✚ Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Küllerin kimyasal özellikleri, yakılan kömürün özelliği, işlenmesi ve depolanmasında kullanılan tekniklere göre değişmektedir. Esas olarak, kalorisi, kimyasal bileşimi, jeolojik kökeni baz alındığında kömürler 4 e ayrılmaktadır. Bunlar;

- Antrasit
- Bitümlü kömür
- Yarı bitümlü kömür
- Linyit kömür [31].

Bu 4 tip kömürün yanması neticesinde elde edilen uçucu külün kimyasal bileşenleri Tablo 1.3’de sunulmuştur. Değerler ağırlıkça yüzde olarak ifade edilmiştir [38,14].

Tablo 1.3. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Bileşenler	Bitümlü Kömür	Yarı Bitümlü Kömür	Linyit Kömür
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
Kızdırma Kaybı	0-15	0-3	0-5

Tablo incelendiğinde, tüm kömür türleri için SiO₂ oranı %20-60, Al₂O₃ oranı %5-35, Fe₂O₃ oranı %4-40 CaO oranının ise %1-40 arasında değiştiği görülmektedir [31]. Kızdırma kaybı, yanmamış Karbon oranının bir diğer ifadesidir. Bu değer uçucu külün kimyasal özelliklerini belirlemede oldukça etkilidir. Bu değer uçucu külün beton üretiminde çimento ikame malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını belirlemektedir [46]. Tablo 1.4’de TS 639’a göre uçucu külün kimyasal özellikleri, Tablo 1.5’de ise Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimi sunulmuştur [37].

Tablo 1.4. TS 639’a göre uçucu külün kimyasal özellikleri

Özellik	Değer
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% en az)	70.0
MgO (% en az)	5.0
SO ₂ (% en çok)	5.0
Rutubet (% en çok)	3.0
Kızdırma Kaybı (K.K) (% en çok)	10.0

Tablo 1.5. Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimi

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	ASTM C 618 SINIRLARI	
					F	C
SiO ₂	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>50
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	-	-
Na ₂ O	N+K	(N+K) 3.0	0.24	2.2	-	-
K ₂ O	-	-	1.81	1.76	-	-
SO ₃	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5
K.K	2.4	0.6	1.39	0.72	<6	<6

1.2.2. Uçucu külün sınıflandırılması

Türkiye’de uçucu küller ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standardı baz alınarak sınıflandırılmaktadır.

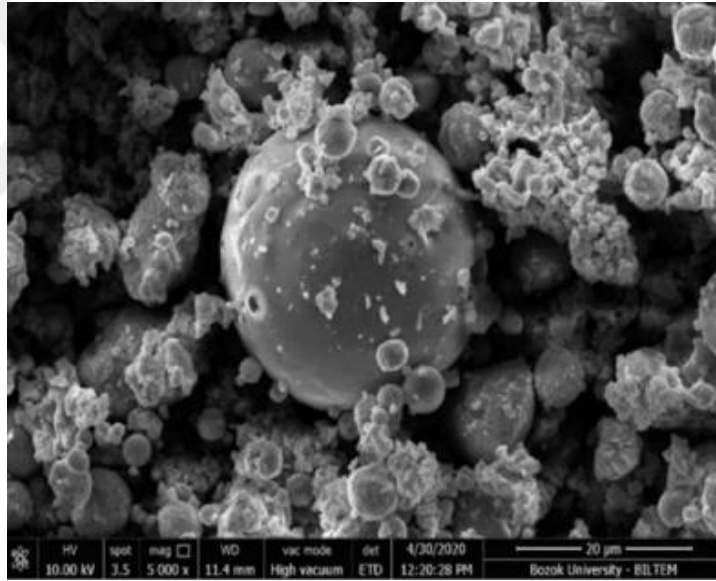
✚ ASTM C 618 Standardı Sınıflandırması

Bu standarda göre uçucu küller C sınıfı ve F sınıfı uçucu küller olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

✓ C sınıfı uçucu küller;

Bu küller düşük kalorili linyit, kireç oranı %20 ve üzeri olan bitümlü linyit kömür ya da yarı bitümlü kömürün yanması sonucu elde edilmektedir [47]. Hem puzolanik hem de bağlayıcı özelliği olması nedeniyle su ile temas ettiğinde dayanım kazanmaktadır [31]. Ana bileşenleri olan $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ün toplam yüzdesi %50'den fazladır. C sınıfı uçucu küller %10 > CaO olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu küller adını almaktadır [47].

Şekil 1.6'da C sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde küllerin mikron ebatlarında küresel taneciklere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bu taneciklerin amorf yapıda ve pürüzlü yüzeye sahip olduğu anlaşılmaktadır [48].

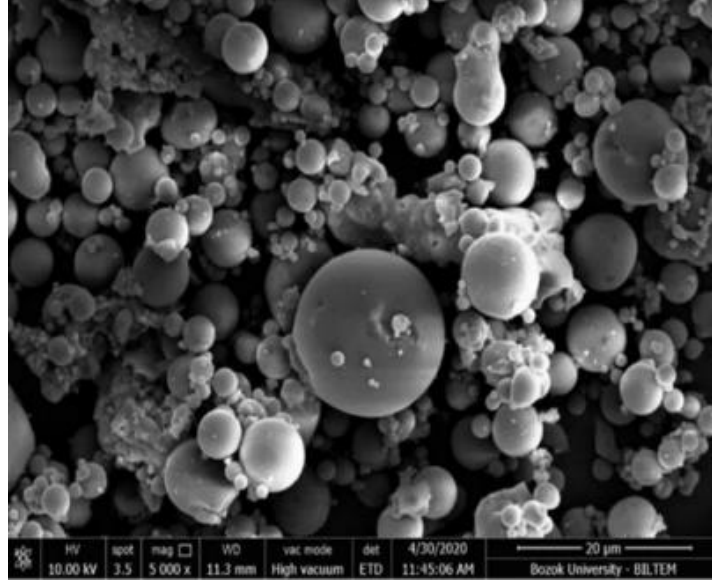


Şekil 1.6. C sınıfı uçucu kül SEM görüntüsü [48].

✓ F Sınıfı Uçucu Küller

Bu küller, bitümlü kömürün yanması sonucu elde edilmektedirler. Puzolanik özelliğe sahip uçucu küllerin yapılarında bulunan düşük oranda (<%10) CaO bulunması sebebiyle bağlayıcılık özelliği neredeyse hiç yoktur [47,29]. Ana bileşenleri olan $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ün toplam yüzdesi %70'den fazladır [32].

Şekil 1.7'de F sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde uçucu külün tanecik ebatları C sınıfı uçucu kül ile aynı fakat yüzeyi pürüzsüz, belirgin ve dağınıktır [48].



Şekil 1.7. F sınıfı uçucu kül SEM görüntüsü [48]

✚ TS EN 197-1 Standardı Sınıflandırması

TS EN 197-1 standardı baz alındığında uçucu küller, silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

✓ V Sınıfı Uçucu Küller

Silissi uçucu küller, bağlayıcılık özelliği bulunmayan fakat aktifleştiricilerle kullanılması durumunda bu özelliği edinen küllerdir. Bu küller, puzolanik özellikte ve küresel tanecikli yapıdadır (TS EN 197-1, 2002). Ana bileşeni $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Bu küllerin CaO oranı $< \%10$ ve reaktif Si oranı $> \%25$ 'tir [46].

✓ W Sınıfı Uçucu Küller

Bu küller hem puzolanik özelliğe hem de hidrolik özelliğe sahiptirler. Ana bileşenleri $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Bu küllerin CaO oranı $< \%10$ ve reaktif Si oranı $> \%25$ 'tir [32,29].

1.2.3. Uçucu külün kullanım alanları

Endüstriyel atık olan uçucu küller gerek çevre kirliliğini önlemeye katkıda bulunmak gerekse kullanılan alanda iyileştirme yapmak amacıyla farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- ✚ Toprak iyileştirme işlemleri [49,50]
- ✚ Dolgu veya yapısal dolgu malzemesi olarak [51]
- ✚ Çimento yerine ikame malzeme olarak [29]

- ✚ Çimento imalatında kil ve kalkerle birlikte [31]
- ✚ Karbon nanotüp imalatında katalizör olarak,
- ✚ Alkali aktivasyon yönteminin kullanılması ve ağır metallerin atık sularından ayrıştırılması [52,53].
- ✚ Beton imalatında
- ✚ Beton içerisinde hafif agrega olarak,
- ✚ Beton içerisinde ince agrega olarak
- ✚ Seramik ürünlerinde hammadde,
- ✚ Baraj, otoyol, altgeçit, nükleer santral vb. uygulamalarda
- ✚ Akıcı Dolgu Harçlarında
- ✚ Geopolimer yapı malzemesi üretiminde,
- ✚ Madencilik Uygulamalarında [30].
- ✚ Maden ıslahlarında
- ✚ Yüksek dayanımlı beton imalatında
- ✚ Tuğla, kerpiç, blok, panel, duvar, gaz beton vb. yapı malzemesi imalatında [32].
- ✚ Öngerilmeli beton yapımında,
- ✚ Yol inşaatlarında
- ✚ Beton ve asfalt içerisinde mineral filler olarak,
- ✚ Atık depolama sahalarının katılaştırma işlemlerinde
- ✚ Tarımsal bazı alanlarda hali hazırda kullanılırken
- ✚ İzole panel üretiminde,
- ✚ Ses bariyerleri üretiminde
- ✚ Peyzaj elemanlarının imalatında [54,31]
- ✚ Boya malzemesi imalatında,
- ✚ Atık sudan metallerin uzaklaştırılması işlemlerinde kullanılmaktadır [38].

1.3. Tuğla

Türkiye ve dünya tarihinde ilk kullanılan yapı malzemesi olan tuğla, kil bazlı toprak malzemesinin suyla karıştırılarak homojen bir hamur elde edildikten sonra 900-1200 °C pişirilmesi ile üretilen en eski malzemedir (Şekil 1.8) [55]. Ham maddesi olan killi toprağa kolay ulaşılabilmesi, pişirme işlemlerinin ucuz olması, yapıya uygulamanın basit olması nedeniyle en çok tercih edilen yapı malzemesidir [56]. Dış etkilere karşı dayanıklı olan tuğla, yapısında fazlaca silis, demir ve karbonat barındırmaktadır. İlk tuğlanın keşfinden beri farklı ebatlarda ve şekillerde üretilmektedir [57]. Pişmiş tuğla üretimi, kullanıcı ihtiyaçları,

dayanıklı binalar ve yüksek katlı yapıların inşa edilme talebinden dolayı milattan önce 4. Yüzyılda başlamıştır [56]. Killi toprağın yapısı, bünyesinde bulunan kum/kil oranı, pişirme sıcaklığı ve üretim tekniği tuğla özelliklerini belirleyen parametrelerdir [58].



Şekil 1.8. Tuğla yapı malzemesi [59]

1.3.1. Tuğlanın tarihçesi

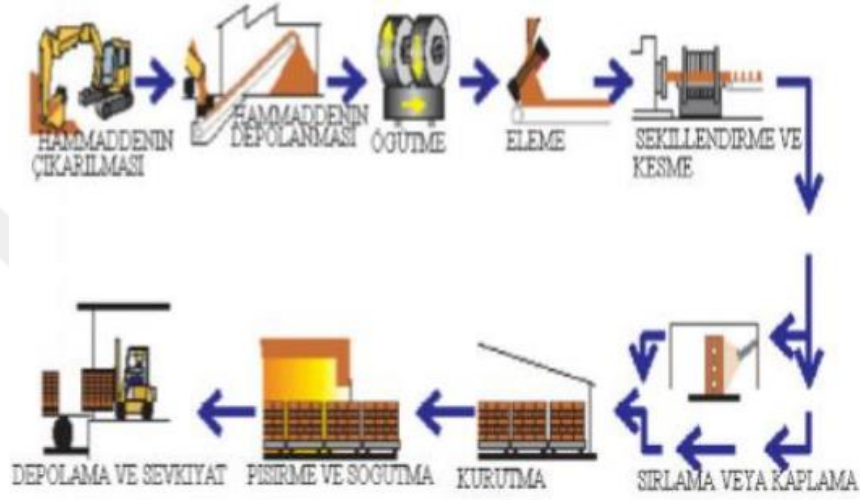
İnsanların yapmış olduğu ilk ev aslında ilk tuğla üretim tesisi olarak kabul görmektedir. Konut yapılmadan önce alanda tuğla üretimi yapıp daha sonra o alana konut yapımına başlanılmıştır. Tarih sahnesinde tuğlanın kronolojisine bakıldığında;

- ✓ İncil’de yer alan bilgilere göre ilk tuğla milattan önce 1200 yılında üretilerek Babil Kulesi’nde kullanılmıştır [60].
- ✓ Mezopotamya’da yapılan arkeolojik kazılarda çıkarılan eserler incelendiğinde kil tabletlerinin milattan önce 13. Yüzyıla dayandığı görülmektedir.
- ✓ Asurlar kil kullanarak pişmemiş tuğla üretmişlerdir.
- ✓ Mısır mabetlerinde kullanılan tuğlaların çok eski çağlara dayandığı görülmektedir.
- ✓ Sahra çölünde yer alan basamaklı piramitin iç kısmında tuğla kullanılmıştır [61].
- ✓ Romalılar tuğla hakkında standart çıkaran ilk millet olmuştur.
- ✓ Fatih sultan Mehmet han bu standardı geliştirmiş ve standart dışı üretimi ve satışı yasaklamıştır.
- ✓ Anadolu’da ilk pişmiş tuğla Lidyalılar tarafından üretilmiştir.
- ✓ Anadolu topraklarına Bizans tuğlayı getirmiş ardında Selçukluların geliştirdiği tuğla, Osmanlı zamanında daha da geliştirilerek kullanımı arttırılmıştır.
- ✓ 18. Yy’da rönesansla birlikte sanayileşme artmış ve seri üretime başlanmıştır [57].
- ✓ 19. YY’da makinalar ile üretim başlamıştır.

- ✓ Şu anda Çin, Hindistan, Bangladeş ve Vietnam küresel boyutta üretilen toplam tuğlanın yaklaşık %75'ine tekabül etmektedir [62].

1.3.2. Tuğla üretimi

Ana hammaddesi kil olan tuğla yapı malzemesinin üretimi altı aşamada gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.9). Bu aşamalar, killi toprağın ocaklardan alınması, hammaddenin hazırlanması, şekil verme, kurutma, pişirme veya fırınlama, fırından çıkarılma ve depolamadır.



Şekil 1.9. Tuğla üretim aşamaları

1. Killi toprağın ocaklardan alınması

Tuğla hammaddesi olan killi tuğla ocaklardan ekskavatör ve loder ile kamyonlara yüklenmekte ve depolama alanına taşınmaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Killi toprağın ocaktan çıkarılması [63]

2. Hammaddenin hazırlanması

Çıkarılan killi toprağın tuğla üretimine dahil edilmesi ve plastik, homojen ve kohezyon özelliğine sahip olması için çok ince bir şekilde öğütülmesi gerekmektedir [64]. Bunun için killi toprak 4 ve 8 ton ağırlığa sahip valslerle valsli değirmen adı verilen değirmenlerde öğütülmektedir. Bu öğütme işlemlerinde kaba boyuttaki toprak kütleleri ve taşları ezilmektedir (Şekil 1.11). Ezilme işlemi tamamlandıktan sonra eleme işlemine geçilerek killi toprak standartlarda belirlenen inceliğe getirilmektedir [65].



Şekil 1.11. Killi toprağın eleme işlemi [66]

3. Şekillendirme

Şekillendirme aşamasında, istenilen boyutlara getirilen killi toprağın homojen ve plastik bir kıvamına gelmesi için su ile karıştırılmaktadır. Su ile karıştırılıp tuğla hamuru oluşturulduktan sonra oluşan hamur şekillendirilmeye gönderilmektedir. Şekillendirme 3 farklı şekilde yapılmaktadır.

- ✚ **Katı çamur metodu;** bu metotta killi toprak yumuşak bir hamur elde etmek için ağırlıkça %12-15 arasında değişen oranda su eklenerek karıştırılmaktadır. Hamur haline getirildikten sonra, işlenebilirliği ve plastikliğini artırmak amacıyla 375-725 mm Hg vakumla içerisindeki hava çekilmektedir. İki boyuttu belirli olan bir kolon kalıbına sıkıştırılarak şekillendirilir. Tuğlanın üçüncü boyutu otomatik kesici ile kesilerek belirlenmektedir [65].
- ✚ **Yumuşak çamur metodu;** katı çamur metodu kullanılarak sıkıştırılmayan tuğla hamuru için kullanılan bir yöntemdir. Su içeriği %20-30 olan tuğla hamuru kalıp içerisinde şekillendirilmektedir. Kil hamurunun kalıba yapışmaması için kalıp kum

veya toprak ile yağlanmakta, kum ile yağlamada kum baskılı, su ile yağlamada su baskılı tuğlalar elde edilmektedir [65].

✚ **Kuru presleme metodu;** plastiklik özelliği düşük olan killerde kullanılmaktadır. Kil ağırlıkça maximum %10 su ile karıştırılıp 3,4-10,3 MPa basınla çelik kalıplar kullanılarak şekillendirilmektedir [65]

4. Kurutma

Tuğla üretiminde kurutma işlemi, şekillendirilmiş tuğla yarı mamül ürünlerinin içerisinde bulunan suyun değişik yöntemler kullanarak bünyesindeki suyun uzaklaştırılmasıdır. Tuğlaların ani bir şekilde kurutulması deformasyona ve çatlamaya neden olmaktadır [66]. Bu sorunların yaşanmaması için tuğlaların pişirilmeden önce kurutulması gerekmektedir [68,69]. Kurutma uygulaması, doğal kurutma (atmosfer şartlarında) ve suni kurutma (sıcaklık ve nemin sabit tutulduğu kurutma odalarında) iki şekilde yapılmaktadır [70].

5. Pişirme veya fırınlama

Pişirme, kurutma işlemi tamamlanmış tuğla malzemesinin, yüksek sıcaklıklara çıkabilen fırınlarda pişirilmesi ve aynı fırın içerisinde soğutma işleminin yapılması olayına denilmektedir [71]. Tuğla pişirme işlemi iki tip fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Bunlar tünel fırınlar ve periyodik fırınlardır. İki fırında da pişirme süresi 40-150 saat arasında değişmektedir. Periyodik fırınlarda pişirme işlemi, doldurma, pişirme, soğutma ve boşaltma şeklinde sıralanmaktadır. Tünel fırınlarda (Hoffman) pişirme işlemi, kurutma işlemi tamamlanan tuğlalar vagonlara konularak, tünel içerisinde yer alan ve her biri farklı sıcaklıklarda olan bölgelerden geçirilerek pişirme işlemi tamamlanır [68]. Sıcaklık 300 °C'ye geldiğinde, tuğla içerisinde organik malzemeler yanmaktadır. 550 °C'de bünyede bulunan boşluklarda yer alan su tuğladan çıkmaktadır. Su bünyeden ayrıldıktan sonra bünyede bulunan silis ve alümin ayrışmaktadır. Sıcaklık 550-900 °C arasında ise silis ve alümin metakaolin silikası meydana getirmektedir. Pişirme işleminin ardından soğutma aşamasında, periyodik fırınlarda 48-72 saat, tünel fırınlarda 48 saat durdurulmaktadır [69]. Pişirme işlemi tamamlandıktan sonra sabit şekilli, sert, mukavemete ve renge sahip tuğlalar üretilmektedir [58]. Tuğla aşırı yüksek sıcaklıklarda piştiğinde camlaşmaya sebep olmakta, bu yüzden pişirme sıcaklığı 900-980 °C olmalıdır [72].

6. Boşaltma ve depolama

Bu işlem, tuğlaların fırından çıkarılması işlemidir. Bu aşamada, pişmiş tuğlalar kalite kontrole tabi tutulur, gruplandırılır, paketleme işlemi yapılır, depolara alınır ve transfer işlemleri için yüklenir. Tuğlalar transfer edilirken kolaylık sağlanması amacıyla çelik teller ile çevrilmiş küp şeklinde paketlenmektedir. Bu şekilde hazırlanan tuğlalar forkliftler yardımıyla kolaylıkla taşınmaktadır. Paketlemeye uygun olmayan uniform şeklinde üretilen tuğlalar ise ağaç paletler yardımıyla transfer edilmektedir [57,65].

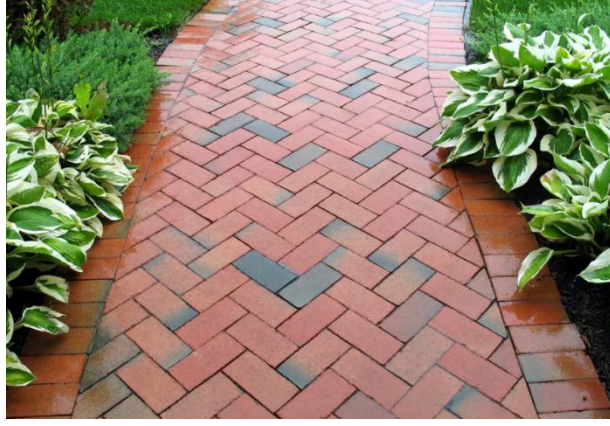
1.3.3. Tuğla çeşitleri

Tuğla spesifik kullanım alanlarına göre sınıflara ayrılmaktadır. Berkgil (2019) [61] tuğla çeşitlerini beş başlık altında incelemiştir. Bunlar;

- İmalat şekiilerine göre
- Yapım yöntemlerine göre
- Delik durumuna göre
- Basınç dayanımına göre
- Boyutlarına göre

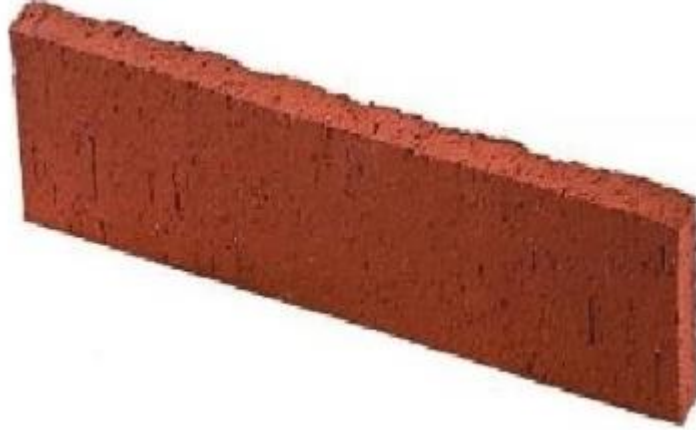
Işık (2010) [73] ise, tuğla çeşitlerini altı başlık altında incelemiştir. Bunlar;

- *Yapı tuğlası*; estetik kaygısı taşımayan, yapısal ve yapısal olmayan tuğlalara denir. Bu sınıfa ait tuğlalar dolgu veya destek elemanı görevi görmektedir.
- *Yüzey tuğlası*; estetik kaygısı taşımayan, yapısal ve yapısal olmayan tuğlalara denir.
- *Delikli tuğla*; yapı tuğlasıyla aynı özelliklere ve daha büyük boşluk alanı sahip tuğlalardır. Bu tuğlalar, çelik ve dolgu malzemesiyle güçlendirilmiş duvar imalatında kullanılmaktadır.
- *Seramik sırlı tuğla*; yüzey tuğlası ile aynı özelliklere sahip ve bünyesinde kaynamış seramik sırrı bulunduran tuğlalardır.
- *Kaldırım tuğlası*; yaya geçişi ve ağır olmayan araçların trafiğini sağlamak için kaldırım yapımında kullanılan tuğlalardır (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Kaldırım tuğlası

- *İnce tuğla*; Kalınlığı normal tuğlaya göre çok daha az olan normal yüzey ebatına sahip tuğlalardır. Bu tuğlalar yüzeye yapıştırıcı vasıtasıyla tutturulmaktadır (Şekil 1.13) [73].



Şekil 1.13. İnce tuğla

1.4. Geopolimer Tuğla

Geopolimer tuğla, tarihte ilk defa 1982’de düşük sıcaklıkta geopolimer priz tekniği ile kırmızı killi topraktan imal edilmiştir. İçerisine ağırlıkça %5 alkali soda (NaOH, KOH) ile kırmızı toprağın yaklaşık 70 °C’de sentezlenmesi yoluyla imal edilen tuğlanın basınç mukavemeti 900 °C’de ısıtılmış kil tuğlaların basınç mukavemetinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra geopolimer kırmızı kil tuğlanın moleküler yapısı suyu bünyede tutma özelliğine sahip olması nedeniyle yapıda nem meydana getirmekte ve serin bir oram sunmaktadır.

Geopolimer tuğla imal edilirken, sodyum hidroksit (NaOH) ya da kalsiyum hidroksit (KOH)le aktifleştirilen tuğla sıkıştırılmaktadır. Alkali soda, ile sentezlenme sırasında ısıl rötreyi bertaraf edip çatlak ve porozite oluşumunu engellemektedir. Geopolimer tuğla, yüksek yangın dayanımına sahiptir [74].



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürül vd., (2020) [75], yapmış oldukları çalışmada, 850, 950 ve 1050 °C'de kil, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) ve uçucu kül (FA) içeren tuğlaların özellikleri üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Üretilen numunelere fiziksel, mekanik, termal testler ve mikroyapısal analizler uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, pişirme sıcaklığının artmasıyla gözeneklilikte azalma, kütle yoğunluğu ve basınç dayanımında artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Uçucu kül miktarının artmasıyla gözeneklilik ve su emme miktarında artış, kütle yoğunluğu ve basınç dayanımı ve termal iletkenlikte azalma olduğunu bildirmişlerdir. Granüle yüksek fırın cürufu içeriğinin artmasıyla basınç dayanımında artış olduğunu ve %30 GGBS + %10 FA içeren ikili tuğlanın kontrol tuğlasıyla hemen hemen aynı özellikleri sergilediğini ifade etmişlerdir.

Singh ve Sengupta, (2022) [76], yapmış olduğu çalışmada, geopolimer tuğla ile ilgili 80'den fazla araştırma makalesini incelemiştir. Bunun yanı sıra gerçek duvar işlerinde kullanıma uygun, standart boyutta, endüstriyel ölçekte geopolimer tuğlalar üretmişlerdir. Çalışmada sonuç olarak, basınç dayanımının alkali çözeltinin molaritesinden/sertleşme süresinden etkilendiğini ve 16 molar NaOH ile hazırlanan tuğlaların mukavemeti daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Apithanyasai vd. (2020) [77], yapmış olduğu çalışmada, atık dökümhane kumu (WFS), uçucu kül (FA) ve elektrik ark ocağı cürufu (EAF cürufu) kullanarak geopolimer tuğla üretmiştir. Bu araştırma çalışmasında WFS, FA ve EAF cürufu 70:30:0, 60:30:10, 50:30:20 ve 40:30:30 oranlarında 8M sodyum hidroksit (NaOH) ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/8\text{M NaOH} = 2,5$ oranında %98 saflıkta sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanmışlardır. Karışımları 5 cm x 5 cm x 5 cm'lik kalıplara dökmüş ve ortam sıcaklığında 28 gün kürlenmiştir. Çalışmada sonuç olarak, 25.76 MPa basınç dayanımı ile 40:30:30 oranında karıştırılan tuğlaların en yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer tuğlalardan elde edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, geopolimer tuğla üretiminin çevresel etkisinin her açıdan beton üretiminden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Ganesh vd., (2020) [78], yapmış oldukları çalışmada, Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GGBS), M-Kum ve Alkali çözeltisi kullanılarak geopolimer tuğla üretimi yapmışlardır. IS 3495 (Bölüm 2): 1992'ye göre tuğla numuneler üzerinde basınç dayanımı

ve su emme testi yapmışlardır. Sonuç olarak, GGBS tabanlı geopolimer tuğlaların daha iyi mühendislik özellikleri ile tasarlanabileceğini bildirmişlerdir.

Youssef vd., (2019) [79]. Yapmış oldukları çalışmada, yeni bir geopolimer tuğlada alkali aktivasyon ile atık tuğlanın (WB) yeniden kullanım potansiyeli incelenmişlerdir. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS), sodyum hidroksit (NaOH) molaritesinin ve silikatın sodyum hidroksite oranının ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) nihai ürünün mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Çalışmada sonuç olarak, 80/20 GGBFS/WB oranı, 8 M NaOH molaritesi ve 2/1 silikat/hidroksit oranı için elde edilen optimum sıkıştırma kuvvetinin 89,91 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca endüstriyel atıkların geri kazanılması ve inşaat sektörü için değerli bir ürüne dönüştürülmesi için etkili bir fizibilite olduğunu tespit etmişlerdir.

Balaji vd., (2021) [80], yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kullanarak geopolimer tuğlayı araştırmışlardır. Daha sonra tuğlayı su emme, basınç dayanımı, Efloresans ve sağlamlık açısından test etmişlerdir. Sonuç olarak; uçucu külün, katı atık bertarafını azaltarak çevreyi doğrudan koruduğunu, geopolimer çözeltisinin mol oranı arttıkça su emme yüzdesinde arttığını bildirmişlerdir. Yüksek mukavemet elde etmek için mol oranının artırılması gerektiğini, su emme özelliğinin geleneksel karışıma göre daha az olduğunu ve tuğla maliyetinin uçucu kül tuğlaya göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

NRamani vd. (2018) [81], Uçucu kül ve Pirinç kabuğu külü ile geopolimer üretimi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, pirinç kabuğu külünün %10 ve üzerinde kullanılması halinde geopolimerin basınç dayanımında azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Pandian vd., (2017) [82], çalışmalarında, uçucu kül esaslı pirinç kabuğu külü katkılı geopolimerin basınç dayanımını incelemişlerdir. Sonuçta, basınç dayanımının pirinç kabuğu külü yüzdesinin artmasıyla kademeli olarak azaldığını bildirmişlerdir. Pirinç kabuğu külünün Uçucu kül yerine %10 oranında kullanılmasının, kontrol geopolimere göre basınç dayanımını %10,2 oranında azalttığını belirtmişlerdir.

Jindal vd. (2020) [83], yaptıkları çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufunu, alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanarak geopolimer üretimi yapmışlardır. Toplam bağlayıcı miktarı 350, 370 ve 400 kg/m^3 olmak üzere üç farklı grup oluşturmuş ve her bir grupta %0, %5 ve %10 oranında pirinç kabuğu kullanmışlardır.

Üretilen geopolimerin mekanik özellikleri ve su geçirimsizliği özellikleri incelemiştir. 28 günlük testler sonucunda 50 MPa'a kadar basınç dayanımına ulaşmışlardır. Pirinç kabuğu külünün geopolimerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüksek fırın cürufu tane boyutu sayesinde betonda oluşabilecek mikro porları engelleyerek permabiliteye olumlu etki yaptığını tespit etmişlerdir.

Singh vd., (2020) [84], yapmış oldukları çalışmada, yapısal uygulamalar için duvarda kırmızı çamur bazlı geopolimer tuğla kullanmanın fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Granüle yüksek fırın cürufu (GBFS), tuğla dökümünde kısmen kum yerine kullanmışlardır. Tuğlaların mekanik özelliklerini değerlendirmiş ve sonuçları analiz etmişlerdir. Çalışmada, optimum kırmızı çamur yüzdesi %30 olarak bulmuş ancak %50 kırmızı çamurla dökülen tuğlaların da 1:1 bağlayıcı:agrega oranıyla 8.7 MPa'lık iyi bir kuru basınç dayanımı elde etmişlerdir. Sonuç olarak, kum kısmen GBFS ile değiştirildiğinde tuğlaların mukavemeti ve sertliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Jeopolimer tuğla ve çimento harcı ile dökülen prizmaların nihai dayanım ve duvarcılık etkinliğinin, jeopolimer harçla dökülenlere göre daha iyi olduğu bildirmişlerdir.

Hwang ve Huynh (2015) [85], yapmış oldukları çalışmada, uçucu külün tuğla üretiminde ince agreganın (%0 ila %40) kısmen öğütülmemiş pirinç kabuğu külü ile değiştirilmesinin etkisini incelemiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak 3:2 oranında uçucu kül ve pirinç kabuğu külü, ince agrega (% 0 ila 40) için kısmi ikame olarak öğütülmemiş pirinç kabuğu külü kullanmışlardır. Kullanılan NaOH'nin molarite değeri 10 M ve katı-sıvı oranı 0,4 olarak belirlemişlerdir. Tuğlaları deney zamanına kadar 35 °C ve %50 bağıl nemde kürelemişlerdir. Sonuç olarak, öğütülmemiş pirinç kabuğu külü eklendiğinde tuğlanın basınç dayanımında ve eğilme dayanımında azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. 28 günlük dökümden sonra basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla 20,9 ila 31,5 MPa ve 5,7 ila 6,7 MPa arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Beulah vd., (2021) [86], yapmış oldukları çalışmada, stabilize edilmiş geopolimer blokların imalatında kil veya şeyl yerine demir cevheri atıklarının (IOT) ve cüruf kumunun kullanılmasını incelemiştir. %5'lik artışlarla %20-40 ve %15-40 aralığında ikame için demir cevheri tortuları ve cüruf kumu kullanmışlardır. Ayrıca %15 sabit değerde uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve sodyum silikatlar (Na_2SiO_3) kullanmışlardır. Ürettikleri numunelerin IS'ı baz alarak mekanik özelliklerini incelemiştir. SEM ve XRD analizleri yaparak mikro yapısını incelemiştir. Sonuç olarak, tuğla malzemesi üretiminde

%25 IOT ve %30 cüruf kumunun dahil edilmesinin kabul edilebilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Çimen vd., (2020) [87], çalışmalarında tuğla özelliklerini iyileştirmek amacıyla perlit ve bor atığı kullanmışlardır. Numuneleri 900 °C'de pişirmiş ve üretilen numunelere fiziksel ve mekanik deneyler yapmışlardır. Tuğla üretiminde perlit ve bor atığı kullanımının tuğla numunelerini mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Ranjitham vd., (2021) [88], çalışmalarında, uçucu kül katkılı geopolimer tuğlanın özelliklerini araştırmışlardır. Numune üretiminde %0, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında uçucu kül ve 1/2 oranında sodyum dumani çözeltisine su ilave ederek kullanmışlardır. Sonuç olarak, çalışma kapsamında üretilen tuğlaların standart tuğlaya göre daha üstün özellikte olduğunu tespit etmişlerdir.

Kang vd., (2021) [89], yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül, arduvaz atığı, uçucu kül ve metakaolin ekleyerek geopolimer tuğla üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini ve SEM görüntülerini inceleyerek değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda; yüksek alkalin aktivatör/katı oranı ve uzun kürleme süresinin numunelerin daha dayanım ve kütle yoğunluğunu arttırdığını su emme miktarını azalttığını bildirmişlerdir. Optimum koşulların, %50 arduvaz atığı, %14 alkali içeriği ve 28 gün kürleme süresi olduğunu ifade etmişlerdir. Optimum koşullarda, üretilen numunelerinin basınç mukavemetinin 20.47 MPa, su emmesi oranının %13.4 olduğu sonucuna varmışlardır.

Amara ve Çağlar (2022) [90], yapmış oldukları çalışmada, son 5 yılda geopolimer tuğla ile ilgili yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Çalışmalarda atık kullanımının tuğlaların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi üzerinde durmuşlardır. Sonuç olarak, tuğla üretiminde atık malzeme kullanımının tuğlaların özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında, geopolimer tuğla üretiminde, killi toprak, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit ve karışım suyu materyal olarak kullanılmıştır.

3.1.1. Killi Toprak

Tez çalışmasında üretilen geopolimer tuğlanın hammaddesi olan killi toprak Kırşehir ili sınırları içerisinde alınmıştır. Toprağın minerolojisi Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde incelenmiş ve elde edilen veriler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo incelendiğinde %38,35 ile en yüksek element değerinin Silisyum (Si) olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra toprak içerisinde oksijen alüminyum ve demir elementi bulunmaktadır.

Tablo 3.1. Geopolimer tuğla üretiminde kullanılan toprağın içinde bulunan elementlerin ağırlık yüzdeleri

Element	Ağırlık (%)
Si	38.35
Al	9.22
Fe	7,45
O	21,78
Nb	5.62
K	2.70
Ca	15.92

3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Tez çalışması kapsamında Kardemir Demir Çelik Fabrikası atığı olan yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun minerolojisi Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde incelenmiş ve elde edilen veriler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo incelendiğinde, %41,97 ile en yüksek değerin SiO₂'ye ait olduğu ve Yüksek oranda CaO, Al₂O₃ ve MgO bileşiklerine de rastlanmıştır.

Tablo 3.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimleri

Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	K.K
%	41,97	10,51	35,66	6,78	1,47	0,35	0,79	0,53	2,20	0,58

K.K: Kızdırma Kaybı

3.1.3. Uçucu Kül

Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül Seyitömer Termik santralinden tedarik edilmiş, minerolojisi Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde incelenmiş ve elde edilen veriler Tablo.... Verilmiştir.

Tablo incelendiğinde, SiO₂, %51,74 ile en yüksek değere sahiptir. Ayrıca uçucu kül içerisinde CaO, MgO, Fe₂O₃ ve Al₂O₃ bileşiklerine de rastlanmaktadır. Çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanımı tercih edilmiştir.

Tablo 3.3. Uçucu külün kimyasal bileşimleri

Bileşim	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O (eşd)	Serbest CaO
(%)	51,74	7,29	5,90	9,08	18,87	0,75	2,35	2,74	1,85	0,25

3.1.4. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit (NaOH), başta kimya sanayi olmak üzere birçok sanayi alanında da sıkça kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri de inşaat alanıdır. Sodyum hidroksit, kaygan, kokusuz ve beyaz renktedir. İyi derecede nem tutma özelliğine sahiptir. Deneysel çalışmada kullanılan Tablo 3.4 de kimyasal değeri ve Şekil 3.1'de görüntüsü verilen sodyum hidroksit, Mikro Teknik firmasından alınmıştır.

Tablo 3.4. Sodyum Hidroksitin kimyasal değerleri (Web İleti zzz))

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit
Kimyasal Formül	NaOH
Molekül Ağırlığı	39,997 g/mol
Yoğunluk	2.13 g/cm ³
Erime Noktası	318 °C



Şekil 3.1. Sodyum hidroksit

3.1.5. Kalsiyum Hidroksit

Sönmemiş kireç içerisine su eklenmesiyle elde edilen kalsiyum hidroksit inşaat alanında da geniş kullanım yelpazesine sahiptir. Rengi beyaz ve toz şeklindedir. Su ile reaksiyona girdiğinde hamurmsu bir kıvam oluşturmaktadır. Kalsiyum hidroksite ait kimyasal değerler Tablo 3.5’de, görüntüsü ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Kalsiyum Hidroksitin kimyasal değerleri [91]

Kimyasal Adı	Kalsiyum Hidroksit
Kimyasal formül	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Molar Kütle	74,093 g/mol
Yoğunluk	2,21 g/cm ³
Erime Noktası	580 °C



Şekil 3.2. Kalsiyum hidroksit

3.1.6. Karışım Suyu

Tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer tuğla numunelerinde Kırşehir ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Tez çalışmasında, geopolimer tuğla numunelerinin üretilmesi, numunelere fiziksel ve mekanik deneylerin uygulanması ve numunelerin SEM görüntülerinin alınması şeklinde bir yöntem uygulanmıştır.

3.2.1. Geopolimer Tuğla Numunelerinin Üretimi

Deneysel çalışmamızda ilk olarak, kullanılan 8 ve 10 M konsantrasyona sahip sodyum hidroksit ve %4 ve %8 oranında kullanılacak olan kalsiyum hidroksit üretime katılmak üzere çözelti oluşturulmuştur. 8 mol sodyum hidroksit 320 gr, 10 mol sodyum hidroksit ise 400 gr kullanılmıştır. Çözelti oluşturmak için 1 lt su cam beher içerisinde ayrı ayrı çözelti haline getirilmiştir. Aynı işlem %4 ve %8 oranında kullanılan kalsiyum hidroksit içinde uygulanmıştır.

İkinci aşamada geopolimer tuğlanın hammaddesi olan killi toprak, Çeyrekleme metoduyla ocaktan alınarak merdaneli ezici öğütme makinasında öğütülerek 1 mm elek altı malzeme

elde edilmiştir. Aynı işlem Kardemir demir çelik fabrikasından alınan yüksek fırın cürufu ve Seyitömer termik santralinden alınan uçucu kül içinde uygulanmıştır.

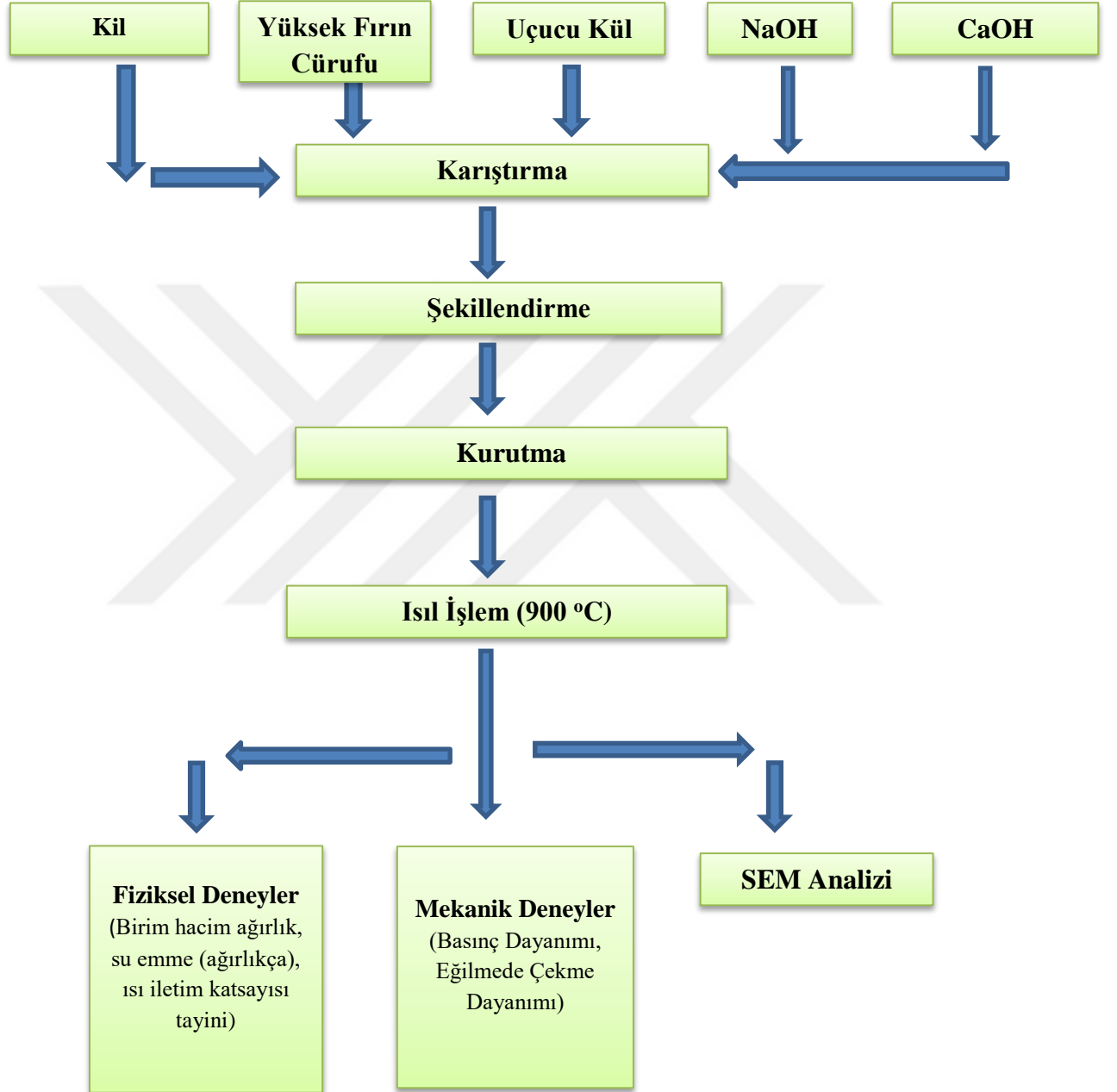
Katı malzemeler hazırlandıktan sonra, Tablo 3.6’da verilen reçete miktarları kullanılarak üretime başlanmıştır. Tabloda bulunan, REF; referans numune, YFC10; %10 oranında yüksek fırın cürufu katkıli geopolimer tuğla, YFC30; %30 oranında yüksek fırın cürufu katkıli geopolimer tuğla, YFC50; %50 oranında yüksek fırın cürufu katkıli geopolimer tuğla, YFC70; %70 oranında yüksek fırın cürufu katkıli geopolimer tuğla anlamına gelmektedir. Çalışmada uçucu kül oranı %20 şeklinde sabitlenmiştir. Kil/Yüksek fırın cürufu oranları 70:10, 50:30, 30:50 ve 10:70 olarak planlanmıştır.

Tablo 3.6. Karışım reçetesi

	Kil (%)	Yüksek Fırın Cürufu (%)	Uçucu Kül(%)	Sodyum Hidroksit (M)	Kalsiyum Hidroksit (%)
REF	100	--	--	--	--
YFC10-8-4	70	10	20	8	4
YFC30-8-4	50	30	20	8	4
YFC50-8-4	30	50	20	8	4
YFC70-8-4	10	70	20	8	4
YFC10-8-8	70	10	20	8	4
YFC30-8-8	50	30	20	8	4
YFC50-8-8	30	50	20	8	4
YFC70-8-8	10	70	20	8	4
YFC10-10-4	70	10	20	10	8
YFC30-10-4	50	30	20	10	8
YFC50-10-4	30	50	20	10	8
YFC70-10-4	10	70	20	10	8
YFC10-10-8	70	10	20	10	8
YFC30-10-8	50	30	20	10	8
YFC50-10-8	30	50	20	10	8
YFC70-10-8	10	70	20	10	8

Literatür incelendiğinde geopolimer tuğla üretiminde NaOH oranını 2.5 olarak tavsiye etmiştir [92,93,94,95]. Bu çalışmalar baz alınarak, tez çalışmasında da NaOH %2.5 kullanılmıştır. Karışım suyu karışımın %20 olarak belirlenmiştir.

Geopolimer tuğla üretim şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Geopolimer tuğla üretim şeması

Çalışmanın üretim aşamasında ilk önce, kuru malzemeler olan kil, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kuru homojen bir karışım meydana getirmek için mikser içerisinde 60 sn ora ayarda karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

Karıştırma işleminin ardından sulu çözelti halindeki NaOH ve CaOH piset ile ağır bir şekilde kil, uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan oluşan kuru karışım içerisine dökülmüş ve 90 sn boyunca düşük ayarda karıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra 90 sn yüksek ayarda karıştırılmıştır. Üretilen tuğla hamuru 4x4x16 cm ebatlarındaki kalıplara, kalıp yağlandıktan sonra dökülmüştür (Şekil 3.4). Sıkıştırma işlemi için 60 vuruş yapılmıştır.



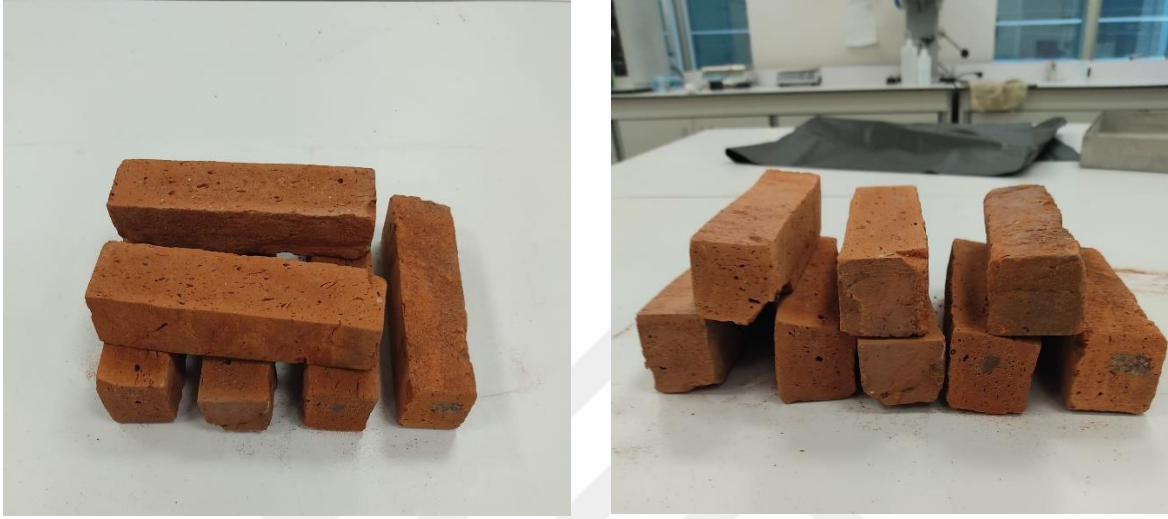
Şekil 3.4. Numune kalıpları

Geopolimer tuğla örnekleri bir gün boyunca kalıp içerisinde bekletilmiştir. Ardından yarı mamül tuğla numuneleri bünyelerindeki suyun atılması için yarı açık alanda kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra, yüksek sıcaklıklı elektrikli fırınlarda sıcaklığı kademeli bir şekilde artırarak pişirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Tuğlaların pişirilmesi

Piştirme işleminin ardından numuneler fırın içerisinde yavaş yavaş soğumaya bırakılmıştır. Piştirme sonrası fırından hemen çıkarılmamasının sebebi, numuneler üzerinde ani sıcaklık değişiminden kaynaklanacak çalama veya kırılma gibi problemlerin yaşanmamasıdır. Şekil 3.6'da verilen ve soğuyan geopolimer tuğla numuneleri fırından çıkarılarak fiziksel ve kimyasal deneylere tabi tutulmuş ve SEM analizi yapılmıştır.



Şekil 3.6. Geopolimer tuğla numuneleri

3.2.2. Geopolimer Tuğla Numunelerine Uygulanan Fiziksek Deneyler

Tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer tuğla numunelerine birim hacim ağırlık, su emme (ağırlıkça), ısı iletim katsayısı tayini deneyleri uygulanmıştır.

A. Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlık deneyi TS 699 standardı baz alınarak yapılmıştır. Bu deney sonucunda yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmaktadır. Elde edilen değerler 3.1 ve 3.2 de verilen formülde yerine yazılarak bulunmuştur. Formülde yer alan p : Yoğunluk (g/cm^3), γ : Birim hacim ağırlık (kN/m), W : Numune ağırlığı (g), V : Numune Hacmi (cm^3) anlamına gelmektedir.

$$p = \frac{W}{V} \quad (3.1)$$

$$\gamma = 9,81 \times p \quad (3.2)$$

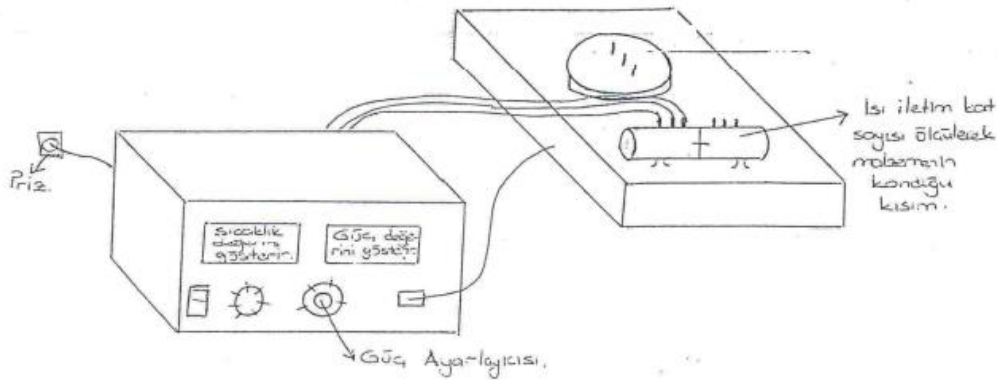
B. Su Emme (Ağırlıkça)

Su emme deneyi TS 699 standardı baz alınarak yapılmıştır. Bu deneyde numunelerin yapılarında bulunan gözeneklerin oran olarak alabilecekleri suyun miktarını belirlemek için uygulanmaktadır. Deney sonunda elde edilen değerler formül 3.3 de yerine yazılarak hesaplanmıştır. Formülde yer alan, A_w : Ağırlıkça su emme oranı (%), w_s : Suyu doyurulmuş numune ağırlığı, w_d : Kuru numune ağırlığı (g) anlamına gelmektedir.

$$A_w = \frac{w_s - w_d}{w_d} \times 100 \quad (3.3)$$

C. Isı İletim Katsayısı Tayini

İçerisinde pirinç silindir ve pirinç disk bulunan ve dışarı ile ısı transferini engelleyecek şekilde izolasyon yapılmış iki kısım bulunmaktadır. Silindir parça arasına değişik malzemelerden yapılmış parçalar konulup sıcaklık değişimleri ölçülebilmektedir. Çeşitli değerler formüller yardımıyla istenilen ısı değerler hesaplanabilmektedir. Hangi parçanın sıcaklıkları ölçülecekse o parçanın üzerindeki bölümlere kablolar yerleştirilmektedir. Bu olay için öncelikle sabit bir değerde güç verilmektedir. Sıcaklıklar ölçülürken bunun rejim haline gelmesi gerekmektedir. Bundan sonra sıcaklık değerleri üzerinden okunmaktadır. Son olarak soğutma suyu ile gerekli işlemler yapılmaktadır. Şekil 3.7’de deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.7. Isı iletim katsayısı tayini deney düzeneği

3.2.3. Geopolimer Tuğla Numunelerine Uygulanan Mekanik Deneyler

Tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer tuğla numunelerine basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

A. Basınç Dayanımı

Deney için Şekil 3.8’de verilen bilgisayar destekli basınç dayanım ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deney TS EN 772-1, 2012 standardı baz alınarak yapılmıştır. Deneye ilk etapta numunelerin cihaz içerisine yerleştirilmiştir. Daha sonra cihaz çalıştırılmış ve numuneye uygulanan basınç altında dayanımı ölçülmüştür. Deneyde elde edilen değerler formül 1.2 de yerine yazılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Basınç Dayanımı: Kırılma yükü / yüzey alanı} \quad (1.1)$$



Şekil 3.8. Basınç dayanım düzeneği

B. Eğilmede Çekme Dayanımı

Numunelere uygulanan eğilmede çekme dayanımı deneyi TS EN 772-6 standardı baz alınarak yapılmıştır. Numunelere dik doğrultuda ve üç noktadan basınç uygulanarak eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır.

3.2.4. Geopolimer tuğla numunelerinin mikro yapısının incelenmesi (SEM Analizi)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numune içyapısının daha detaylı bir şekilde incelenmesi için yapılan bir analizdir. Cihazdan gönderilen elektronların numune atomlarıyla etkileşime girerek numune yüzeyindeki kompozisyon ve topografi ile ilişkili veriler bulunduran değişik sinyaller üretmektedir. Sinyaller dedektörler vasıtasıyla toplanır ve kullanılan bilgisayarın ekranına aktararak görüntü oluşturma esasına dayanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer tuğla numunesinin SEM analizi Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Sem görüntülerinin alınması için Şekil 3.9'da görülen JEOL JSM 6060 LV marka SEM cihazı kullanılmıştır.



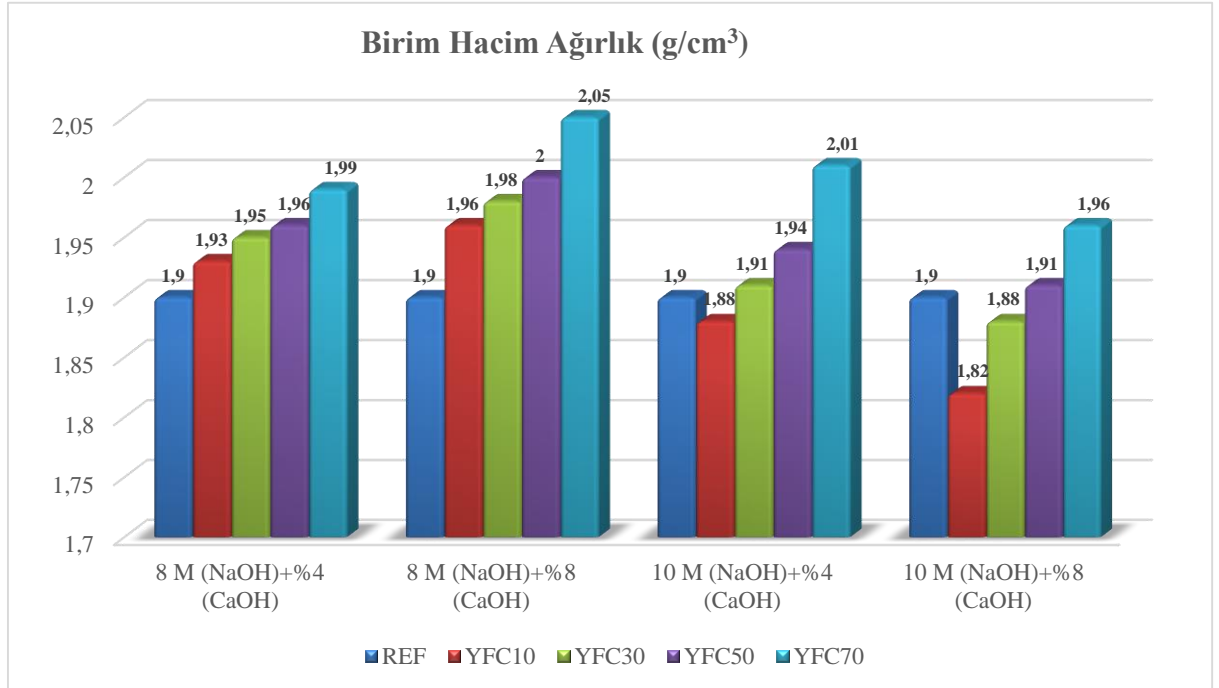
Şekil 3.9. SEM cihazı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer tuğlalara birim hacim ağırlık, su emme (ağırlıkça), ısı iletim katsayısı tayini, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

4.1. Birim Hacim Ağırlık

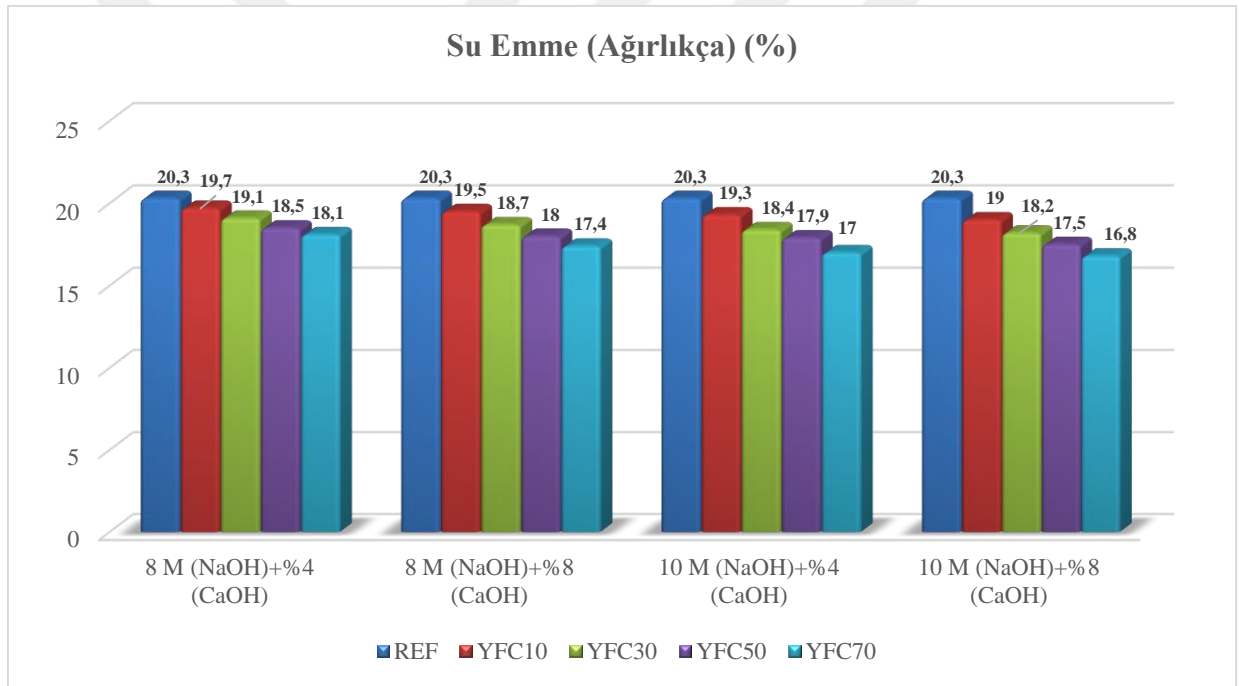
Birim hacim ağırlık deneyi sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.1 de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde; tüm numunelerde birim hacim ağırlık değerinin 1,82 ile 2,05 gr/cm³ arasında değiştiği görülmüştür. En düşük birim hacim ağırlığının 1,82 g/cm³ ile 10 M (NaOH)+%4 (CaOH) katkıli YFC10 numunesinden, en yüksek birim hacim ağırlığının ise 2,05 g/cm³ ile 8M (NaOH)+%8 (CaOH) katkıli YFC70 numunesinden elde edildiği görülmüştür. 8 M (NaOH) konsantrasyonlu numunelerde yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla birim hacim ağırlığının arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksit oranının artmasıyla YFC10 numunelerinin birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı, daha sonra yüksek fırın cürufu ikamesinin artmasıyla birim hacim ağırlık değerlerinin de arttığı görülmüştür. TS 705'e göre birim hacim ağırlık değerinde herhangi bir sınır bulunmamaktadır. Fakat birim hacim ağırlığı düşük olan (hafif) tuğlaların daha faydalı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.1. Birim hacim ağırlık değerleri grafiği

4.2. Su Emme (Ağırlıkça)

Çalışma kapsamında üretilen numunelere uygulanan su emme deney sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yüksek fırın cürufu oranı arttıkça su emme miktarının azaldığı görülmektedir. Referans numunenin %20,3 ile en yüksek su emme oranına sahip olduğu görülmüştür. Katkılı numunelerde su emme değerleri ASTM C62-10 [96] gereksinimlerinin sınırlarının altında ve %19,7 ile %16,8 arasında değişmektedir. Yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla su emme oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit oranının artmasıyla su emme değerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Yüksek konsantrasyonda sodyum hidroksit içeren karışımlarda daha yüksek derecede geopolimerizasyon, daha az gözenekli bir matris ile sonuçlanmış ve sonuç olarak daha düşük su emme oranı elde edilmiştir.

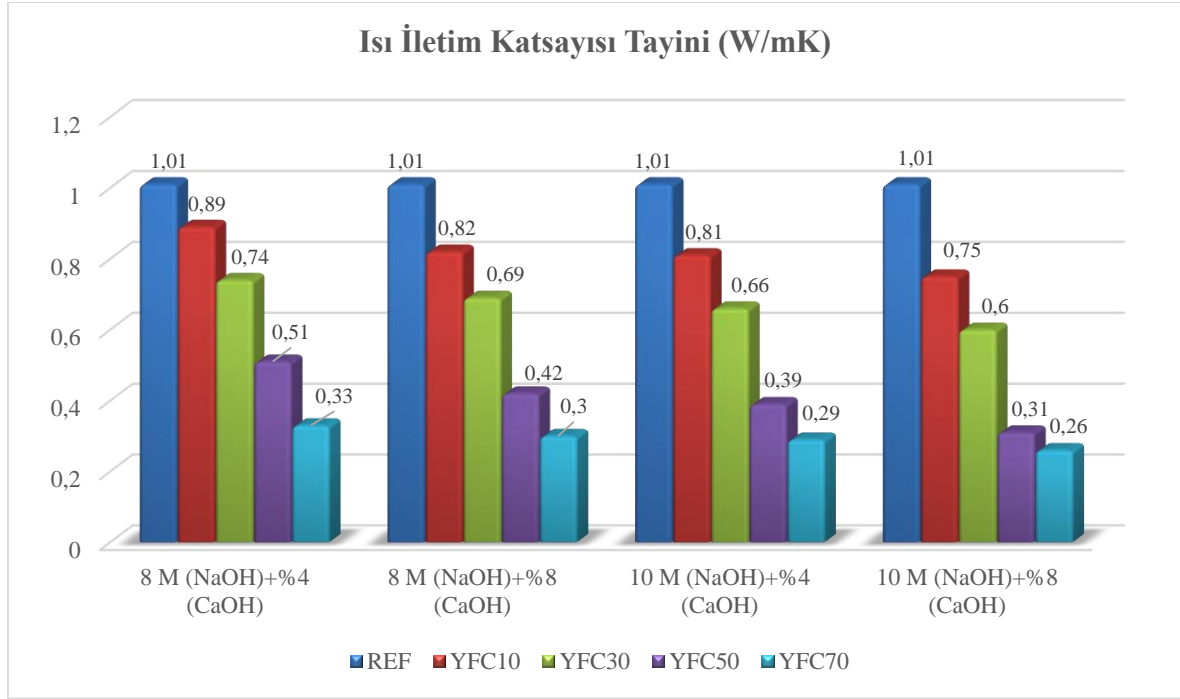


Şekil 4.2. Su emme değerleri grafiği

4.3. Isı İletim Katsayısı Tayini

Geopolimer tuğlaların ısı iletim katsayısı tayini deney sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekilde sodyum hidroksit baz alındığında, sodyum hidroksit miktarının artmasıyla ısı iletim katsayısında azalma olduğu görülmüştür. Kalsiyum hidroksit baz alındığında yine kalsiyum hidroksit miktarının artmasıyla ısı iletim katsayısında iyileşme olduğu görülmüştür. Bütün kategorilerde yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla ısı iletim katsayısında azalma olduğu

görülmüştür. Bunun nedeninin yüksek fırın cürufunun iç yapısının boşluklu ve hafif malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük ısı iletim katsayısı 0,26 W/mK ile YFC70-10-8 tuğla numunelerinden elde edildiği görülmektedir. Bu değer diğer çalışmalarla kıyaslandığında, bor atığı katkılı [97], ferrosilicon cüruf ve alümina atık katkılı [98], geleneksel delikli tuğla [99], uçucu kül tabanlı [100] geopolimer tuğladan daha iyi ısı yalıtım özelliğine sahiptir.

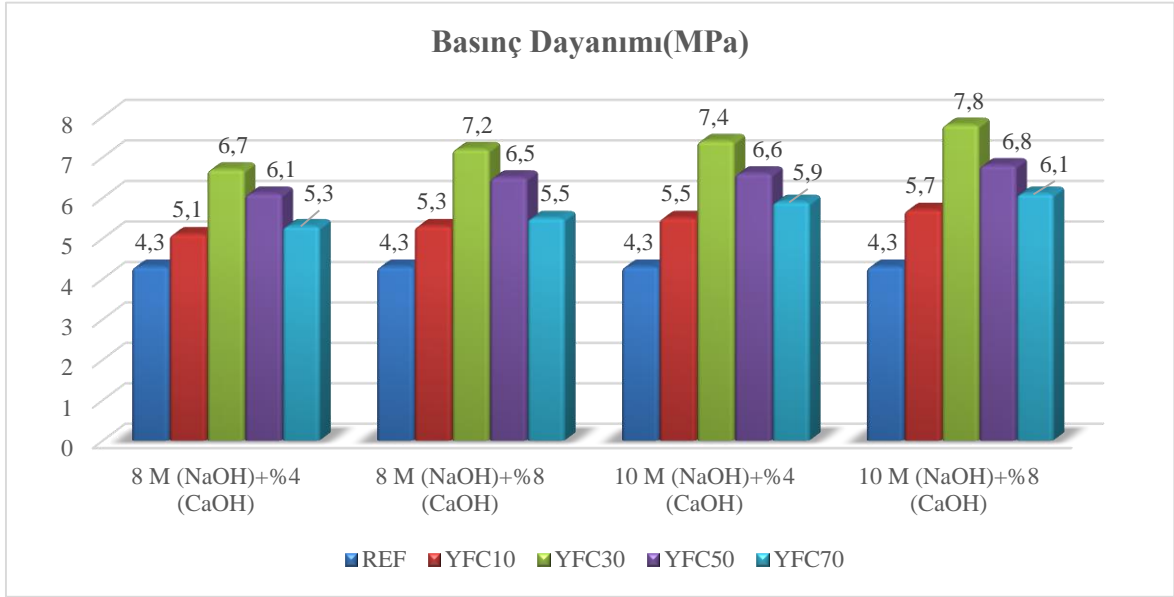


Şekil 4.3. Isı iletim Katsayısı tayini deney sonuçları

4.4. Basınç Dayanımı

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin basınç dayanım değerleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde; referans numunenin 4,3 MPa, katkılı numunelerin basınç dayanım değerlerinin 5,1-7,8 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Katkılı numunelerde en düşük basınç dayanımı 5,1 MPa ile 8 M (NaOH)+%4 (CaOH) katkılı YFC10 numunelerinden, en yüksek basınç dayanımı ise 7,8 MPa ile 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) katkılı YFC30 numunelerinden elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımında %18,6, en yüksek basınç dayanımında ise %81,4 oranında artış meydana gelmiştir. Sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit oranı arttıkça basınç dayanımında artış meydana geldiği görülmüştür. 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) katkılı YFC30 katkılı numunelerinin kil bünyesinde bulunan Al_2O_3 , uçucu kül ve yüksek fırın cürufunda bulunan CaO, SiO_2 ile reaksiyona girmekte ve basınç

dayanımının artmasına katkıda bulunmaktadır. Elde edilen bu değerler diğer çalışmalarla kıyaslandığında benzerlik göstermektedir (Sudhir vd., 2021; Madani vd., 2020; Sürül, 2015)

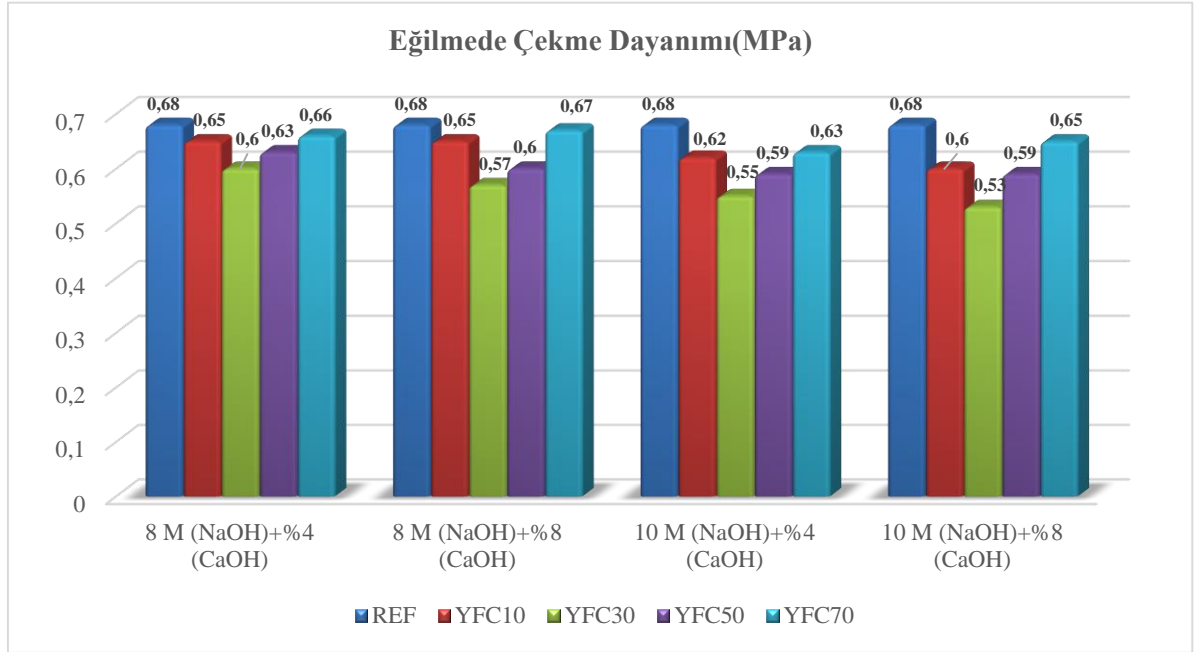


Şekil 4.4. Basınç dayanımı değerleri grafiği

4.5. Eğilmede Çekme Dayanımı

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde; eğilmede çekme dayanım değerlerinin 0,68 ile 0,53 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Referans numunenin 0,68 MPa ile en yüksek eğilmede çekme dayanım değerine sahip olduğu, 0,53 MPa ile 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) kakılı YFC30 katkılı numunelerin en düşük eğilmede çekme dayanım değerine sahip olduğu

görülmüştür. Üretilen numunelerin mekanik deneyler sonucunda optimum yüksek fırın cürufu katkısının %30 olduğu tespit edilmiştir.

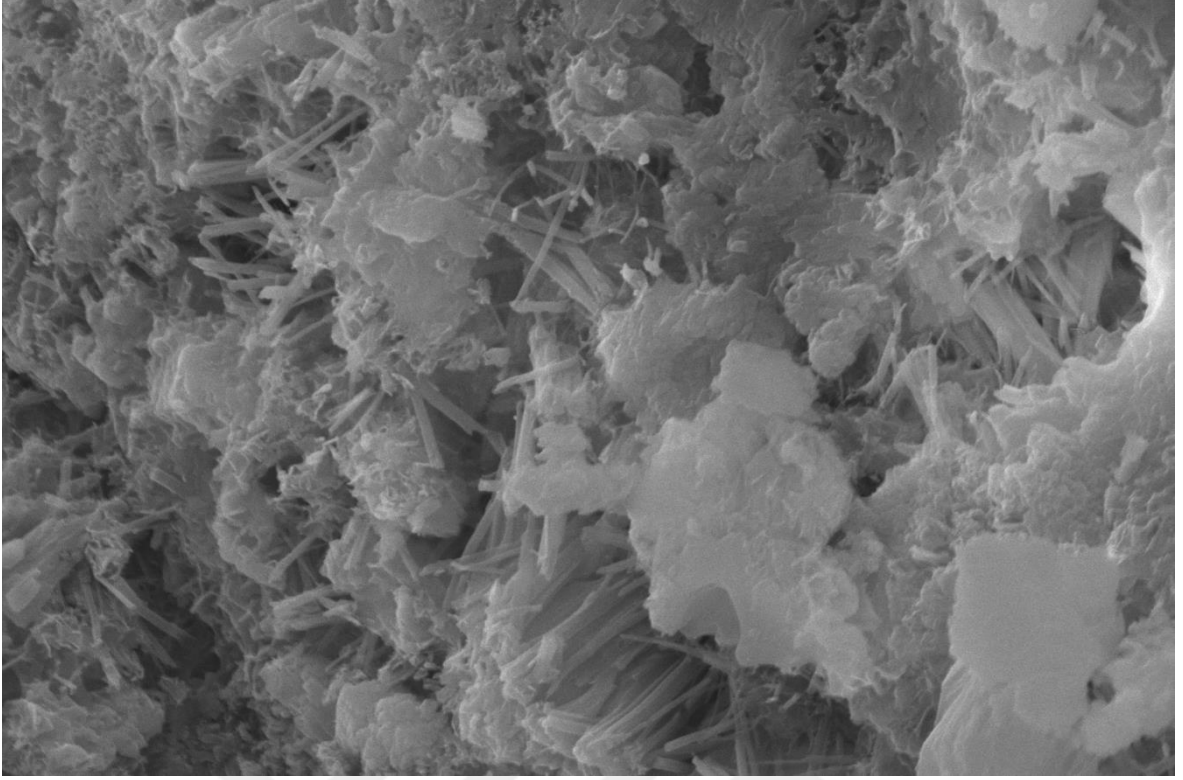


Şekil 4.5. Eğilmede çekme dayanımı değerleri grafiği

4.6. SEM Görüntülerinin Analizi

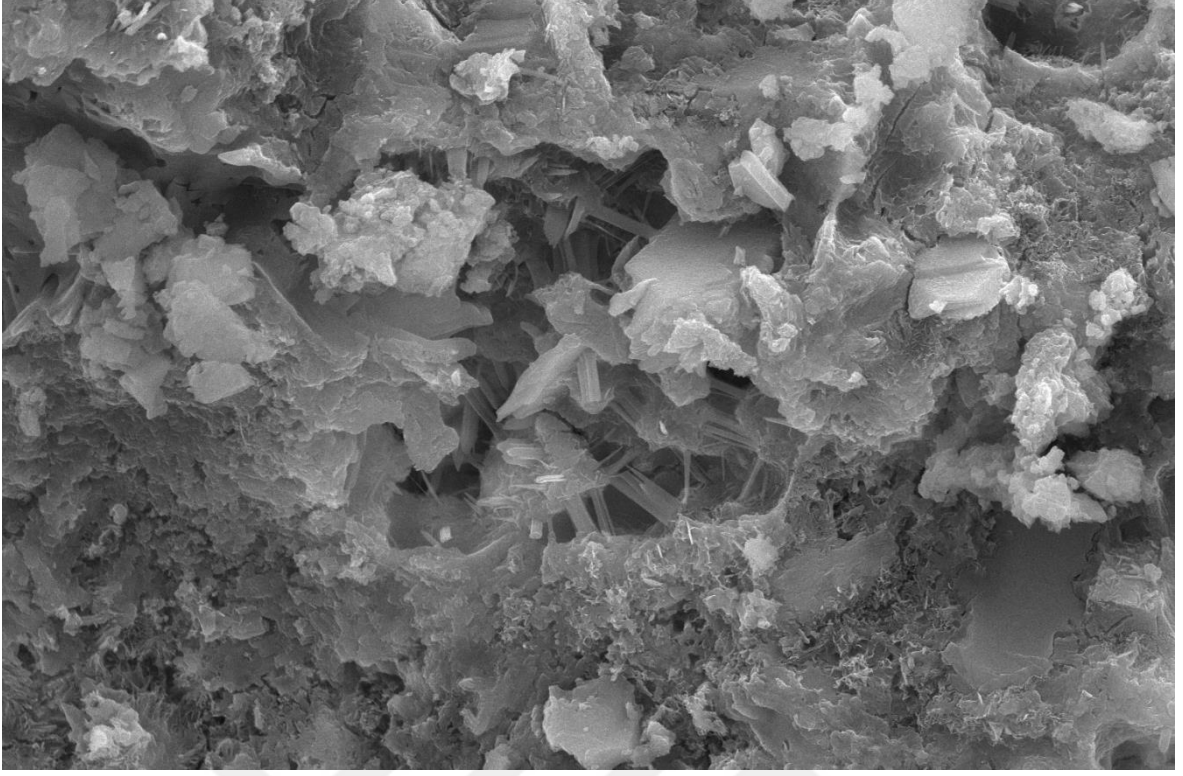
Çalışma kapsamında üretilen referans numune ve 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu YFC30 numunesinin mikro yapısını gösteren SEM görüntüleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Basınç dayanımı en yüksek numune, 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu YFC30 numunesi olduğu için bu numunenin SEM görüntüsünün yorumlanması tercih edilmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde, amorf yapıların yoğun olduğu, kristal yapının ise nadir bulunduğu görülmektedir. Yoğun olan amorf yapılar zamanla kristal yapıya dönüşmektedir.



Şekil 4.6. Referans numunenin SEM görüntüsü

Şekil 4.7 incelendiğinde, atık malzeme düzensiz şekillere ve açık mikro yapıya sahip kaba kristal parçacıklardan oluşmaktadır. Geopolimerin mikro yapısındaki homojenlik, yoğun ve homojen bir matris olduğu için mikro yapı analizinden açıkça anlaşılmaktadır. Ayrıca, geopolimerin içinde hapsolmuş hava kabarcıklarının varlığı da görülebilmektedir. Sodyum hidroksit konsantrasyonu ikamesi ile iri tanelerin daha ince tanelere dönüştüğü ve birbirine yapıştığı görülebilmektedir. İyi şekillendirilmiş, sınırlı bir mikro yapı geliştirilmekte ve sonuç olarak amorf bir mikro yapı oluşmaktadır. Kalsiyum hidroksit daha ince ve homojen bir mikro yapı oluşturduğunu göstermektedir. Basınç dayanımı testi sonuçları ve SEM görüntüleri birbirlerini destekler niteliktedir. Ayrıca sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit konsantrasyonu, numunelerin stabilitesine katkıda bulunduğunu da ortaya koymuştur.



Şekil 4.7. 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu YFC30 numunesinin SEM görüntüsü

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Karabük Demir Çelik Fabrikası atığı olan yüksek fırın cürufu ve Seyitömer termik santrali atığı uçucu kül kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimer tuğla üretimi hedeflenmiştir. Çalışmada fiziksel ve mekanik açıdan normal tuğlaya göre üstün özelliklere sahip, termal özellikleri daha iyi bir geopolimer tuğla üretimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda geopolimer tuğla üretilmiş ilgili deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- ❖ 8 M (NaOH)+%4 (CaOH) konsantrasyonlu numunelerde en düşük birim hacim ağırlık referans, en yüksek birim hacim ağırlık ise YFC70 numunelerinden elde edilmiştir. Bu konsantrasyonda yüksek fırın cürufunun artmasıyla birim hacim ağırlık değerinde de artış olduğu görülmüştür.
- ❖ 8 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu numunelerde en düşük birim hacim ağırlık referans, en yüksek birim hacim ağırlık ise YFC70 numunelerinden elde edilmiştir. Bu konsantrasyonda yüksek fırın cürufunun artmasıyla birim hacim ağırlık değerinde de artış olduğu görülmüştür.
- ❖ 10 M (NaOH)+%4 (CaOH) konsantrasyonlu numunelerde en düşük birim hacim ağırlık YFC10, en yüksek birim hacim ağırlık ise YFC70 numunelerinden elde edilmiştir. Bu konsantrasyonda yüksek fırın cürufunun %10 kullanımı birim hacim ağırlık değerini düşürmüş daha sonra yüksek fırın cürufu arttıkça değer yükselmiştir.
- ❖ 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu numunelerde en düşük birim hacim ağırlık YFC10, en yüksek birim hacim ağırlık ise YFC70 numunelerinden elde edilmiştir. Bu konsantrasyonda yüksek fırın cürufunun %10 kullanımı birim hacim ağırlık değerini düşürmüş daha sonra yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça değer yükselmiştir. YFC10 ve YFC30 numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri referans numunesinin değerinin altındadır.
- ❖ Tüm konsantrasyonlarda, yüksek fırın cürufu ikame miktarının artmasıyla su emme oranında azalma meydana gelmiştir.
- ❖ Tüm konsantrasyonlarda, yüksek fırın cürufu ikame miktarının artmasıyla ısı iletim katsayısı değerinde azalma meydana gelmiştir. En düşük ısı iletim katsayısı 0,26

W/mK ile 10 M (NaOH)+%8 (CaOH) konsantrasyonlu YFC70 numunelerinden elde edilmiştir.

- ❖ Tüm konsantrasyonlarda geopolimer tuğla numunelerinin basınç dayanımı %30 oranında yüksek fırın cürufu ikamesine kadar artmış, yüksek fırın cürufu oranının daha da artmasıyla basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.
- ❖ Tüm konsantrasyonlarda geopolimer tuğla numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerleri %30 oranında yüksek fırın cürufu ikamesine kadar azalmış, yüksek fırın cürufu oranının daha da artmasıyla eğilmede çekme dayanımı da artmaya devam etmiştir.
- ❖ Mekanik deneyler için optimum karışım oranının %30 olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ SEM görüntülerinde, kristal bir yapıda olan referans numunesine atık malzeme ikamesiyle amorf bir yapıya dönüştüğü görülmüştür.
- ❖ Ayrıca atık malzemelerin sodyum hidroksit etkisiyle birbirlerine yapıştığı, bu durumun basınç dayanımına katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.
- ❖ Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tuğla yapım malzemesi olarak kullanılması ekonomik olarak uygun bir seçenek olduğu görülmüştür.
- ❖ Agregada endüstrilerinin atıklarını kullanarak geopolimer tuğlalar üretmek, uygun hazırlama koşulları (sodyum hidroksit konsantrasyonu, kalsiyum hidroksit içeriği), kullanılarak mümkün olabileceği görülmüştür.
- ❖ Atıkların tuğla üretiminde agregada olarak kullanımı hem çevre hem de insan sağlığı açısından atık bertarafı için çok uygun ve uygulanabilir bir yöntem olacaktır.
- ❖ Atıkların bertarafı depolama maliyetlerini düşürecek, bu da işletmelerin ekonomisine yarar sağlayacaktır.
- ❖ Tuğla üretiminde atıkların agregada olarak kullanımı oluşumu yüzyıllar süren toprağın daha az tüketilmesini sağlayacaktır.
- ❖ Enerjinin oldukça önemli olduğu günümüzde, ısı iletim katsayısı düşük malzemelerin üretilmesi ek yalıtım masrafı yapılmasını engelleyecektir.

❖ KAYNAKLAR

- [1]. Rahman, ME., Ong, PJ., Nabinejad, O., Islam, S., Khandoker NAN., Pakrashi, V. and Shorowordi, KM. 2018, Utilization of blended waste materials in bricks, *Technologies*, 6 (20), 1-12.
- [2]. Houben, H., Guillaud, H. 1994, *Earth construction: A Comprehensive Guide*, London.
- [3]. Pancheti, J., Mahen Mahendran (2023). Fire resistance of external light gauge steel framed walls with brick veneer cladding, *Thin-Walled Structure*, 182 (2023) 110162.
- [4]. Niroumand, H., Zain, MFM., Alhosseini, SN. 2013, The influence of nano-clays on compressive strength of earth bricks as sustainable materials, *Procedia –Social and Behavioral Sciences*, (89), 862–865.
- [5]. Shakir, AA., Naganathan, SK., Mustapha, KNB. 2013, Development Of Bricks From Waste Material: A Review Paper. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8), 812-818.
- [6]. Tchadjié, L.N., Djobo, J.N.Y., Ranjbar, N., et al., 2016, Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis, *Ceramics International*, 42 (2016), 3046-3055.
- [7]. Sithole, N.T., Mashifana, T. 2020, Geosynthesis of building and construction materials through alkaline activation of granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 264 (2020), 120712.
- [8]. Sithole, T., Mashifana, T., Mahlangu, D., Tchadjié, L. 2023, Effect of binary combination of waste gypsum and fly ash to produce building bricks, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 31, April 2023, 100913.
- [9]. Erdoğan, Ş., Kurbetci, Ş. 2003, Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4), 115-120.
- [10]. Uysal, F.F., Bahar, S. 2018, Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 37-52.
- [11]. Tokyay, M., Erdoğan, K. 1997, Cüruf ve cürüflü çimentolar. TÇMB/AR-GE/Y97.2, Ankara
- [12]. Koçak, B., Şahin, Y.İ., Koçak Y., 2023, Portland Çimentosunun Eğilme Dayanımına Yüksek Fırın Cürufu Etkisinin Bulanık Mantık ve ANFIS ile Tahmini, *Journal of ESTUDAM Information*, 4(1), 17-24.
- [13]. Çağlar, H., Çağlar, A., 2019, Research of Physical and Mechanical Properties of Blended Bricks with Fly Ash Based Blast Furnace Slag Addition, *International Journal of Research –Granthaalayah*, 1–10.
- [14]. Ay, D., 2022, Çanakkale İli Termik Santrallerinin Uçucu Kül Karakterizasyonunun Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [15]. Davidovits, J., 1991, Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 38(8), 1633-1656.
- [16]. Siddique, R., Khan, S., Mohammadı, J. 2011, *Supplementary Cementing Materials*, Springer.
- [17]. Akça, U., 2022, Yüksek Fırın Cürufu İle Birlikte Bazik Pomza Kullanılan Alkali İle Aktive Edilmiş Harçların Özellikleri, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [18]. Uğurlu, S. 2015, Yeni Nesil Yüksek Fırın Cürüflü CEM III B-C Tipli Çimentoların Yüksek Sülfatlı Ortamlarda Performansı (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi.
- [19]. Kheder, G.F., Al-Gabban, A.M. ve Suhad, M.A. 2003, Mathematical model for the prediction of cement compressive strength at the ages of 7 and 28 days within 24 hours, *Materials and Structures*, 36, 693-701.
- [20]. Danishyar, F., 2021. Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Kompozit Malzeme Özelliklerine Polipropilen Lif Katkısının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21]. Mert, M. 2021. Ponza Tozu Ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali İle Aktive Edilmiş Malzemenin Fiziksel, Mekanik Ve İyapı Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22]. Shi, C. ve Qian, J. 2000, High performance cementing materials from industrial slags – a review, *Resources, Conservation and Recycling*, 195–207.
- [23]. Tekingündüz, M. 2021. Yüksek Fırın Cürufu İçeren Betonlarda Sıcak Kür Yöntemi İle Erken Dayanım Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [24]. Swamy, R.N. 1986, Slags And Slag Cement, Cement Replacement Materials (Concrete Technology & Design), R. N. Swamy, Dü., Guilford, Surrey University Press, 1986, pp. 73-99.
- [25]. Tokyay, M. ve Erdoğan, K. 2003. Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, TÇMB/Ar-Ge.
- [26]. Pal, S.C., Mukherjee, A. ve Pathak, S.R. 2003, Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1481– 1486.
- [27]. Kosmatka, S.H. Kerkhoff, P., William, C., 2003, Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association Publication, 2003.
- [28]. Canbaz, M., 2007, Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların özellikleri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [29]. Erdoğan, G., 2022, Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Perlit Ve Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [30]. Özsoy, E.F., 2022, Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu İçeren Alkali Aktive Edilmiş Kompozitlerin Yüksek Sıcaklığa Karşı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31]. Ahmararslan, H., 2022, Yüksek Lisans Tezi, Farklı Tip Agregaların Silis Dumanı Katkılı Uçucu Kül İle Üretilen Geopolimer Harçlarda Yüksek Sıcaklık Direnci Üzerine Etkisi, Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [32]. Tek, M., 2022, Doğal Lif Ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Mekanik Ve Bazı Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33]. Rasool, H., 2022, Fresh And Hardened Properties Of Rubberized Fly Ash Based Geopolymer Composite, Master Of Science (MSc) Thesis, Harran University Graduate School Of Applied And Natural Science.
- [34]. Karakuş, D., Özdoğan, M. V., Turan, G., Konak, G., Onur, A. H. 2018, Termik Santral Katı Atık Depolama Sahası Kapasitesinin Arttırılması Olanaklarının Araştırılması: Yatağan Termik Santrali Örneği, *Yerbilimleri*, 39(2), 103-116.
- [35]. Rossow, M. 2003, Fly ash facts for highway engineers. New York NY Continuing Education and Development.

- [36]. Ünal, O., Uygunoglu, T. 2004, Soma termik santral atığı uçucu külün inşaat sektöründe değerlendirilmesi. Maden.org.
- [37]. Waberi, H.S. 2022, Uçucu Kül Kullanılarak Hazırlanan Beton Karışımların Basınç Dayanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38]. Ahmaruzzaman, M., 2010, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- [39]. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (Ed.). 2009, Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri (2. baskı). Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- [40]. Savaş E., 2021, Termik Santral Külü ve Fritin Seramik Bünyede Birlikte Kullanımının Bazı Fiziksel Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi, V.Uluslararası Seramik,Cam,Emaye, Sır ve Boya Kongresi , Eskişehir, Türkiye, 13-15 Ekim, s.129- 136, 2021.
- [41]. Hamalı, Y. 2007, Metakolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42]. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. 2005,Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2Q05, 09-12 Haziran 2005, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir. 419-423
- [43]. Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., Demir, İ. 2009, Uçucu Kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42, 2009.
- [44]. Karakulak, E. 2019, Uçucu kül ve kablo atıklarının çimento harcı üretiminde kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [45]. Siddique, R. 2007, Waste materials and by-products in concrete. Springer Science & Business Media.
- [46]. Yeğınobalı, A. 2011, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [47]. ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American society for testing and materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2003.
- [48]. Kaya, M. 2020, Yüksek ve düşük kalsiyum içeren uçucu küller ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(2), 96-104.
- [49]. Dermatas, D., Meng, X., 2003, Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils, *Engineering Geology*, 70(3-4), 377-394.
- [50]. Pandey, V. C., Singh, N., 2010, Impact of fly ash incorporation in soil systems, *Agric Ecosyst Environment* , 136(1-2), 16-27.
- [51]. Baykal, G., Edinçlıler, A., Saygılı, A., 2004, Highway embankment construction using fly ash in cold regions, *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 209-222.
- [52]. Bankowski, P., Zou, L., Hodges, R., 2004, Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 114(1-3), 59-67.
- [53]. Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W.H., Wang, H., 2016, Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications, *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- [54]. Aruntaş, H. Y. 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 193-203.

- [55]. Cultrone, G., Sebastian, E. 2009, Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks, *Construction and Building Materials*, (23), 1178-1184.
- [56]. Ulusoy, A. 2008, Uçucu Kül-Tekstil Fabrikası Atık Külü Ve Bazaltik Pomzanın Tuğla Üretiminde Katkı Olarak Kullanılması Yüksek Lisans Tezi Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [57]. Ertaş, N.Y. 2017, Bazı Atık Maddelerin Tuğla Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [58]. Sürül, O. 2015, Yüksek Fırın Cürufu Ve Uçucu Külün Tuğla Üretiminde Katkı Olarak Kullanılmasının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Zonguldak.
- [59]. Web ileti 1: <https://www.Web.akdenizinsaat.com.tr/tr/tugla-cesitleri/> . Erişim Tarihi 23.12.2022.
- [60]. Zal B. 2010, Zeolit, Tras Ve Uçucu Kül İle Tuğla Üretimi Ve Standard Tuğla İle Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [61]. Berkgil, M. 2019, Kırpılmış Cam Elyaf Ve Polipropilen Katkılı Tuğla Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [62]. Anant L. Murmu, M Patel, A.,2018, Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*, 165, 112–125.
- [63]. Web ileti 2: <http://www.baykaratugla.com.tr/baykara-tugla-uretim-asamalari/>. Erişim Tarihi: 24.12.2022.
- [64]. DPT, 2001, 2607-ÖİK:618, Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Kimya Sanayii Hammaddeleri, Cilt 1, Ankara.
- [65]. İnce, A.S., 2019, Tuğla Bünyesinde Kömür Artığı Ve Bor Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [66]. Web ileti 3: <http://www.baykaratugla.com.tr/baykara-tugla-uretim-asamalari/>. Tarihi: 24.12.2022.
- [67]. Uz, V., Işık, İ., Özdağ, H., Demirbilek, F. ve Demirbilek, M. 2006, Tuğla kiremit üretiminde vakumlu şekillendirmenin kilin plastiklik ve kurutma davranışlarına etkisinin ön araştırması, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (12), 105-116.
- [68]. Şahin, Ş. E. 2008, Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [69]. Çimen, S. 2019, Bor Atığı Ve Perlit Katkılı Üretilen Tuğlanın Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [70]. Şişman, C. B., Kocaman, İ. ve Gezer, E. 2006, Tekirdağ yöresinde üretilen ve tarımsal yapılarda yaygın olarak kullanılan tuğlanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 3 (1): 32- 40.
- [71]. Aksin, E. 2007, Endüstriyel Atıklarının Tuğla Ve Kiremit Üretiminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [72]. Ekmekyapar, T. ve Örüng, İ. 1993, İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Yayınları No: 145, Erzurum, 22-36.
- [73]. Işık, İ., 2010, Tuğla ve Kiremit Üretim Teknolojisi Ders Notları, Kütahya.

- [74]. Aykut, C. 2017, Bayburt Taşı Atıklarının Geopolimer Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [75]. Surul, O., Bilir, T., Gholampour, A., Sutcu, M., Ozbakkaloglu, T., Gencel, O., 2020, Recycle of ground granulated blast furnace slag and fly ash on eco-friendly brick production. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(5), 1-12
- [76]. Singh, B.K., Sengupta, S., 2022, An overview of fy ash utilization in production of geopolymer bricks and various factors influencing its strength. *Innovative Infrastructure Solutions* (2022) 7, 283
- [77]. Apithanyasai, S., Supakata, N., Papong, S., 2020, The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production, *Heliyon* 6, (2020), e03697.
- [78]. Ganesh, A. C., Muthukannan, M., Aakassh, S., Prasad, Subramanaian B, 2020, IOP Conferance Series: *Materials Science and Engineering* 872 (2020) 012154.
- [79]. Youssef, N., Rabenantoandro, A.Z., Dakhli, Z., Chapiseau, C., Waendendries, F., Chehade, F.H., Lafhaj, Z., 2019, Reuse of waste bricks: a new generation of geopolymer bricks, *SN Applied Sciences*, 1252 (2019),
- [80]. Balaji, M., Kumar, A.M., Priyanka, S., Vishwa, K. 2021, Geo Polymer Brick By Using Flyash And Rice Husk Ash, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 3(3), 1624-1627.
- [81]. NRamani, P., Jongvivatsakula, P., Thanyawat, P. and Vanchai, S., 2018, Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high calcium fly ash geopolymer concrete, *Journal of Cleaner Production*.
- [82]. Pandian, K., Pandian, S. Usman, M.K., 2017, Study on flyash and rice husk ash based geopolymer concrete with steel fiber, *Civil Engineering Systems and Sustainable Innovations* 179-183.
- [83]. Jindal, B.B., Jangra, P. and Garg, A., 2020, Effects of ultra fine slag as mineral admixture on the compressive strength, water absorption and permeability of rice husk ash based geopolymer concrete, *Material Today: Proceedings*, 32(4), 871-877.
- [84]. Singh S., Aswath, M.U., Ranganath, R.V., 2020, Performance assessment of bricks and prisms: Red mud based geopolymer composite, *Journal of Building Engineering* 32 (2020) 101462.
- [85]. Hwang, C.L., Huynh, T.P., 2015, Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 335–341.
- [86]. Beulah, M., Kumar, J.P., Mohan, M.K., Gopalakrishnan, G., Sudhir, M.R., 2021, A Sustainability Approach to Geopolymer Brick Manufacture Using Mine Wastes, *Handbook of Solid Waste Management*, 1–18.
- [87]. Çimen, S., Çağlar, H., Çağlar, A., Can, Ö., 2020, Effect of Boron Wastes on the Engineering Properties of Perlite Based Brick. *Turkish Journal of Nature and Science*, 9(2), 50-56.
- [88]. Ranjitham, M., Vishvapriya, M., Pavya, K., 2021, Experimental Investigation on Geopolymer Bricks, *Advances in Civil Engineering*, Conference, 97-106.
- [89]. Kang, X., Gan, Y., Chen, R., Zhang, C., 2021, Sustainable eco-friendly bricks from slate tailings through geopolymerization: synthesis and characterization analysis, *Construction and Building Materials*, 278, (2021), 122337.

- [90]. Amara, S.N.A., Çağlar, A., 2022, Geopolimer Tuğla Üretiminde Atık Kullanımı Üzerine Yapılan Akademik Çalışmalar, *Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*, 5(2), 171-176.
- [91]. Web iletii 4. <https://emboykimya.com.tr/urunler/kalsiyum-hidroksit/>. Erişim Tarihi: 20.12.2022
- [92]. Abdullah, M.M.A., Ibrahim, W.M.W., Tahir, M.F.M., 2015, The properties and durability of fly ash-based geopolymeric masonry bricks, in: F. Pacheco-Torgal, P.B. Lourenço, J.A. Labrincha, S. Kumar, P.B.T.-E.-E.M.B. and B. Chindaprasirt (Eds.), Woodhead Publishing, Oxford.
- [93]. Zawrah, M.F., Gado, R.A., Feltin, N., Ducourtieux, S., Devoille, L., 2016, Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast furnace slag for geopolymer production, *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237–251.
- [94]. Venugopal, K., Radhakrishna, M., Sasalatti, V., 2016, Development of Alkali Activated Geopolymer Masonry Blocks, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149 (2016), 12072.
- [95]. Apithanyasai, S., Nooak, P., Supakata, N., 2018, The Utilization of Concrete Residue with Electric Arc Furnace Slag in the Production of Geopolymer Bricks, *Engineering Journal*, 22 (2018), 1–14.
- [96]. ASTM C62-10, Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [97]. Al Amara, S.N., Çağlar, A. 2022, Determination Of The Heat Conduction Coefficient Of Boron Waste, Fly Ash Based Geopolymer Bricks, Current View Of Building Material, Lambert Akademik Publishing.
- [98]. Ahmed, M.M., El-Naggar, K.A.M., Tarek, D., Ragab, A., Sameh, H., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Maafa, İ.M., Yousef, A. 2021, Fabrication of thermal insulation geopolymer bricks using ferrosilicon slag and alumina waste, *Case Studies in Construction Materials*, 15(2021)e00737.
- [99]. TS EN 772,1, (2012), Methods of test for masonry units- Part 1: Determination of compressive strength, Turkish Standardization Institute, Ankara.
- [100]. Feng, J., Zhang, R., Gong, L., Li, Y., Cao, W., Cheng, X. 2015, Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity, *Materials and Design*, 65 (2015), 529-533.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	HUSSEIN JASIM MOHAMMED AL-HASANI
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	2000

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	
Mezuniyet Tarihi	2012

Doktora	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	Program Adı
Mezuniyet Tarihi	

Makale ve Bildiriler	