

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**METAKAOLİN VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASI
KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Funda TOP

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**METAKAOLİN VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASI
KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Funda TOP
(200150005)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**METAKAOLİN VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASI
KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Funda TOP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 16/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

İmza
Prof. Dr. Niyazi Uğur
KOÇKAL
(Akdeniz Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza
Doç. Dr. Nihan
GÜLMEZ
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza
Dr. Öğr. Üyesi Selim
CEMALGİL
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç.Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza

Funda TOP

Danışman

Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimim boyunca benden ilgi ve alakasını eksik etmeyen, her türlü bilgisini, tecrübesini ve desteğini benden esirgemeye, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ'e teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi tez çalışmam boyunca da benden sabrını, sevgisini ve desteğini esirgemeyen sevgili anneme, babama ve ablama, bu yaşıma kadar tecrübeleriyle yolumu daima aydınlatıp bana ışık tutan abime ve hayatıma girdiği andan bu yana iyiliğim için maddi manevi her türlü desteği veren eşim Muhammed Enes AL'a teşekkür ederim.

Funda TOP
TUNCELİ-2023



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
RESİMLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ.....	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Metakaolin	4
2.2. Yüksek Fırın Cürufu	5
2.3. Uçucu Kül.....	8
2.4. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası.....	9
2.5. Alkali Aktivatör	10
2.6. Geopolimerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi	11
2.7. Geopolimerin Kimyası	13
2.8. Geopolimerin Fiziksel, Kimyasal ve Durabilite Özellikleri	13
3. MATERYAL ve METOT	15
3.1. Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	15
3.1.1. Agrega.....	15
3.1.2. Bağlayıcı.....	16
3.1.3. Alkali Aktivatör	17
3.2. Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar	18
3.2.1. Çeneli kırıcı	18
3.2.2. Elek.....	19
3.2.3. Hassas Terazî	20
3.2.4. Harç Karıştırma Mikseri.....	20
3.2.5. Çelik Kalıplar	21
3.2.6. Yayılma Tablası.....	21
3.2.7. Sarsma Tablası.....	22
3.2.8. Etüv.....	23
3.2.9. Eğilme ve Basınç Dayanımı Test Cihazı	23
3.2.10. Arşimet Terazisi	24
3.3. Geopolimer Harçların Üretimi (Karışım Tasarım Yöntemi)	25
3.3. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	27
3.3.1. Taze harç kıvam tayini.....	27
3.3.2. Taze harcın birim hacim ağırlığı.....	28
3.4. Sertleşmiş Harçların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	29
3.4.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite	29
3.5.Sertleşmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	30
3.6. Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi	32
3.6.1.Kılcal geçirimsizlik.....	32
4. BULGULAR	33

4.1. BT'nin Yayılma Çapı ve Birim Hacim Ağırlığı Üzerindeki Etkisi.....	33
4.2. BT'nin Yığın Yoğunluklar Üzerine Etkisi.....	34
4.3. BT'nin Su Emme Üzerine Etkisi	36
4.4. BT'nin Görünür Porozite Üzerine Etkisi.....	37
4.5. BT'nin Eğilmede Çekme Dayanımı Üzerine Etkisi	38
4.6. BT'nin Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi	40
4.7. BT'nin Kılcal Su Emme Üzerine Etkisi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
6.KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	54



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yüksek fırın cürufunun oluşumunun şematik görünümü.....	6
Şekil 3.1. Geri dönüştürülmüş beton agregaların gradasyon eğrisi.....	16
Şekil 4.1. Tüm serilerin kuru yığın yoğunluk değerleri	35
Şekil 4.2. Tüm serilerin DYK yığın yoğunluk değerleri	36
Şekil 4.3. Tüm serilerin su emme yüzdeleri	37
Şekil 4.4. Tüm serilerin porozite yüzdeleri	38
Şekil 4.5. Tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları	39
Şekil 4.6. Tüm serilerin basınç dayanımları	41
Şekil 4.7. Tüm serilerin kılcal su emme katsayıları	44

RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1. Elâzığ İli Abdullahpaşa Mahallesinde agregaların toplandığı moloz alanı	15
Resim 3.2. a) Metakaolin; b) Öğütülmüş Yüksek fırın cürufu; c) Uçucu Kül.....	17
Resim 3.3. NaOH'ın pelet olarak görünümü	18
Resim 3.4. Çeneli kırıcı.....	19
Resim 3.5. Sarsma cihazı ve elekler.....	19
Resim 3.6. Deneylerde kullanılan hassas terazi	20
Resim 3.7. Harç karıştırma mikseri.....	21
Resim 3.8. a)Dökdörtgen prizma kalıp; b) Küp kalıp.....	21
Resim 3.9. Yayılma tablası.....	22
Resim 3.10. Sarsma tablası	22
Resim 3.11. Etüv	23
Resim 3.12. Eğilme ve basınç dayanımı test cihazı	24
Resim 3.13. Arşimet terazisi	24
Resim 3.14. a) 24 saat suda bekletilen numune örnekleri; b) Arşimet terazisi yardımıyla numunelerin suya doygun kuru yüzey ağırlık ölçümü	29
Resim 3.15. Eğilmede çekme deneyi	31
Resim 3.16. Kılcal geçirimsizlik deneyi için hazırlanan numunelerin bırakıldığı düzenek ..	32
Resim 4.1. YM2 serisinin kopma sonrası görseli.....	39
Resim 4.2. U serisinin kopma sonrası görseli	40
Resim 4.3. YM2 serisinin kırılma görseli	41
Resim 4.4. YU3 serisinin kırılma görseli.....	42
Resim 4.5. Y, YM1, YM2, YU1, YMU1, YMU2, YU2, YMU3 ve U serilerinin kılcal su emme deneyi sonundaki görselleri	44
Resim 4.6. YMU4, YU3, YMU5, YMU6, UM1 ve UM2 serilerinin kılcal su emme deneyi sonundaki görselleri.....	45

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Birbirinden farklı çalışmalarda kullanılan farklı tip metakaolinlerin kimyasal kompozisyon örnekleri	5
Tablo 3.1. Bu çalışmada kullanılan bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları.....	17
Tablo 3.2. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm ³)	26
Tablo 4.1. Tüm serilerin yayılma çapları ve birim hacim ağırlıkları	34



SEMBOLLER LİSTESİ

ρ_{tbha}	: Taze harcın birim hacim ağırlık, g/cm ³
$M_{kap+harç}$	: Harç karışımı ile dolu kabın ağırlığı, g
M_{kap}	: Kabin ağırlığı, g
V_{kap}	: Kabin hacmi cm ³ ifade etmektedir.
M_{kuru}	: Numunenin kuru ağırlığı
M_{sdyk}	: Numunenin suya doymun kuru yüzey ağırlığı
M_{suda}	: Numunenin sudaki ağırlığı
R_f	: Eğilmede çekme dayanımı, MPa
F_f	: Uygulanan yük, N
L	: Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm
b	: Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm
R_c	: Basınç dayanımı, MPa
F_c	: Kırılmadaki en büyük yük, N
A	: Yükleme plakalarının alanı (40mmx40mm), mm ²

KISALTMALAR LİSTESİ

CO ₂	: Karbondioksit
yy.	: Yüzyıl
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
K ₂ O	: Potasyum Oksit
SO ₃	: Kükürt trioksit
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
TiO ₂	: Titanyum dioksit
MPa	: Mega pascal
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
TS	: Türk standardı
ASTM	: American society for testing and materials
m	: Molarite
THBB	: Türkiye hazır beton birliği

ÖZET

Dünya nüfusu her geçen gün katlanarak artmakta ve insanların en temel ihtiyaçlarından olan barınmaya talep hızla artmaktadır. Bu talebi karşılamak için insanoğlunun ilk başvurduğu yapı malzemesi betondur. Beton üretiminde kullanılan temel hammaddelerden olan çimentonun üretimi esnasında çok ciddi enerji harcanmakla birlikte en önemli zararı ise üretimi esnasında açığa çıkan CO₂ ve diğer zararlı gazların küresel ısınmayı tetikleyerek yeryüzüne geri dönüşü olmayan zararlar vermektedir. Ayrıca diğer hammadde olan agregaların doğal kaynakları tükenmektedir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalar neticesinde çimentolu betona alternatif olarak geopolimer beton sunulmuştur. Geopolimer betonun mantığı atık kullanımıdır. Bu tez çalışmasının amacı da çoğunlukla atık malzemeler kullanılarak taşıyıcı özellikte bir geopolimer harç üretmektir. Çalışmada, çimento yerine endüstriyel birer atık olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile birlikte metakaolin kullanılmıştır. Atık kullanımı mantığından ilerlemek adına agrega olarak ise moloz halinde bulunan inşaat yıkıntı atıklarından alınan geri dönüştürülmüş beton parçaları öğütülerek kullanılmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolinin bağlayıcı olarak farklı oranlarda ikamesi ettiği harçların alkali aktivasyonu için NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Numuneler 100°C’de 72 saat etüv kürüne maruz bırakılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde bağlayıcı tipinin etkisini incelemek adına fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini tayin edecek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip YM2 serisi (%90 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %10 metakaolin) 30,50 MPa değerine ulaşmıştır. Yine aynı serinin eğilme dayanımı da seriler arasında en yüksek değer olan 9,35 MPa’dır. Sonuçlar taşıyıcı özellikte çimentolu harçlarla karşılaştırıldığında tatmin edici niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, geri dönüştürülmüş beton, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin

ABSTRACT

Investigation Of The Physical And Mechanical Properties Of Geopolymer Mortars Manufactured Using Methaolin And Recycled Concrete Aggregate

The world population is increasing exponentially day by day and the demand for shelter, which is one of the most basic needs of people, is increasing rapidly. In order to meet this demand, the first building material used by mankind is concrete. While the production of cement, which is one of the basic raw materials used in concrete production, consumes a lot of energy, the most important damage is CO₂ and other harmful gases released during its production, triggering global warming, causing irreversible damage to the earth. In addition, natural resources of aggregates, which are other raw materials, are depleted. As a result of the studies carried out so far, geopolymer concrete has been presented as an alternative to cementitious concrete. The logic of geopolymer concrete is the use of waste. The aim of this thesis is to produce a geopolymer mortar with carrier properties by using mostly waste materials. In the study, instead of cement, ground blast furnace slag and fly ash, which are industrial wastes, together with metakaolin were used. In order to move forward with the waste usage logic, recycled concrete pieces taken from the construction demolition wastes in the form of rubble were grinded and used as aggregate. NaOH and Na₂SiO₃ were used for alkali activation of mortars in which ground blast furnace slag, fly ash and metakaolin were substituted at different rates as binders. The samples were exposed to oven curing at 100°C for 72 hours. In order to examine the effect of binder type on the produced samples, experiments were carried out to determine the physical, mechanical and durability properties. Considering the test results, YM2 series with the highest compressive strength (90% ground blast furnace slag and 10% metakaolin) reached 30.50 MPa. Again, the bending strength of the same series is 9.35 MPa, which is the highest value among the series. The results are satisfactory when compared with cementitious mortars with bearing properties..

Key words: Geopolymer mortar, recycled concrete, ground blast furnace slag, fly ash, metakaolin

1.GİRİŞ

Her yıl nüfus artış hızıyla doğru orantılı olarak artan enerji ihtiyacının 2030 yılına kadar %40 artacağı tahmin edilmektedir (Polat, 2020). Halihazırdaki enerji ihtiyacının önemli bir kısmı fosil yakıtlardan sağlanmakta ve bu da atmosfere büyük oranda CO₂ salınımına sebep olmaktadır. Bu enerji ihtiyacının yaklaşık %30-40'ı inşaat sektörü tarafından tüketilmekle birlikte sektörün enerji talebinin 2050 yılına kadar %58 artması beklenmektedir (Abdollahnejad ve ark., 2015; Novais ve ark., 2018).

19. yy.'da Portland çimentosunun keşfi inşaat sektöründe tatmin edici basınç dayanımına sahip beton üretilmesini sağlamaktadır. Portland çimentolu bağlayıcılar bu sektörün en önemli unsuru olmaya devam etmektedir. Bu çimento yapı sektöründe en çok kullanılan inşaat malzemesidir. Beton üretiminde bağlayıcı harcın büyük bir bölümünü Portland çimentosu oluşturmaktadır. Portland çimentosunun üretimi önemli miktarda enerji kullanımına sebep olur ve bu enerji fosil yakıtlardan sağlandığından üretim esnasında atmosfere büyük ölçüde CO₂ ve diğer sera gazlarının salınımı gerçekleşmektedir. Çimento üretim tesislerinin bilinen bu etkilerinin yanı sıra belki de üzerinde durulmayan en mühim etkisi çevreye kadminyum elementini de yaymasıdır. Kadmiyumun insan sağlığı, bitki ve hayvan üretimi üzerinde oldukça negatif etkiler gösterdiği bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır (Kabırova, 2022; Kartalkanat, 2009). Ayrıca bu çimentonun üretimi yüksek miktarlarda hammadde kullanımına sebep olduğundan sektör için doğal kaynaklar hızla tükenmektedir.

Portland çimentosunun yüksek karbon ayak izi ve doğal kaynak tüketimi bilim insanlarını daha sürdürülebilir alternatif aramaya yöneltmiştir (Rasool, 2022). Bu çalışmalar neticesinde çimentoya alternatif olarak puzolan olarak adlandırılan, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak başka malzemeler ile kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan ürünler ortaya çıkmıştır (Bayram, 2023). Metakaolin, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi puzolanlar alkaliler ile aktive edilerek çimento benzeri bağlayıcı ürünlerin elde edilebileceği görülmüştür (Durak, 2019). Portland çimentolu harca en iyi alternatif geopolimer kabul edilmektedir (Davidovits, 2013). Geopolimer, terim olarak ilk kez 1970'li yıllarda Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır.

Geopolimer, yüksek yoğunluklu alkali hidroksit ya da silikat solüsyonlu katı alüminosilikat kaynaklarının polimerik reaksiyonları olan üç boyutlu inorganik polimerler olarak değerlendirilebilir (Görhan, 2020). Çevresel yönden geopolimerin düşük karbon

salınımı ve üretimi açısından da geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması ile Portland çimentolu harçlardan üstünlükleri bulunmaktadır. Bununla birlikte önceki çalışmalar bize geopolimerin Portland çimentolu harçla karşılaştırıldığında yüksek mekanik dayanım, iyi bir dayanıklılık performansı, hızlı sertleşme ve gelişmiş termal direnç gibi daha iyi özellikler sergilediğini göstermektedir (Rasool, 2022). Yapılan birçok çalışmaya rağmen teknik engeller ile standart ve spesifikasyonların eksikliği nedeniyle geopolimer uygulaması çok yaygın uygulanamamaktadır (Novais ve ark., 2019).

700°C'den başlayarak kaolin kilinin maruz kaldığı ısı işlemi, iç suyun kaybı ve dehidroksilasyonu ile kristal kaolinin amorf metakaoline dönüşümü ile sonlanır (Özer ve Soyer Uzun, 2015). Kaolinit termal olarak dehidroksilasyona uğradığında, alkali ortamda çözünür ve bu çözünme geopolimerizasyon için metakaolini istenilen özellikte bir hammadde haline getirir (Kaya ve Soyer Uzun, 2016). Bu yüzden geopolimer malzeme üretiminde metakaolin malzemesinin kullanılma sebepleri arasında bu malzemenin homojen bir yapıya sahip olması ve büyük miktarlarda elde edilebilen endüstriyel bir mineral olması gösterilebilir (Roynanik, 2010).

Atık malzeme halinde ortaya çıkan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ülkemizde ve dünyada ciddi anlamda çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Bu malzemelerin atık olmaktan çıkarılıp, kullanılabilir bir ürün haline gelmesi çevre sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir (Bayram, 2023). Araştırmacılar uygun alkaliler yardımı ile bu atık malzemelerin geopolimer sistemlerde kullanılabilirliği üzerinde çalışmalarını artırmışlardır (Durak ve ark., 2021). Yapılan çalışmalarla yüksek fırın cürufu ve uçucu küllerin alkalilerle aktive edilmesi ve farklı koşullarda kür edilmeleriyle bağlayıcı özellik kazandığı görülmüştür (Bingöl ve ark., 2020).

Geleneksel beton yapımında neredeyse çimentodan üç kat daha fazla agrega kullanılmaktadır. Bu agregalar doğadan temin edilmektedir. Ancak kaynaklar giderek tükenmektedir. Bilim insanları karşı karşıya kaldıkları bu duruma çözüm olarak çeşitli atıkları değerlendirme yönünde çalışmalara başlamıştır. Bu atıklardan biri de kullanım ömrünü doldurmuş, doğal afetler sebebiyle zarar görmüş veya çeşitli sebeplerle yıkılmış yapılardan ortaya çıkan beton parçalarıdır. Dünya üzerinde ortaya çıkan yıllık âtıl haldeki beton miktarı 1 milyon tonu aşmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton, temiz üretim ve sürdürülebilirliğe katkısı açısından araştırmacılar tarafından en çok tercih edilen geri dönüştürülebilir malzeme kaynağından biri olmaktadır.

Çalışmanın amacı, ana bağlayıcı olarak atık malzemeler kullanılarak çimentolu harca alternatif bir geopolimer harç üretmektir. Bu bağlamda çalışma endüstriyel atıkların değerlendirilerek çevre dostu ve düşük maliyetli üretim sağlama potansiyeli bakımından ayrıca doğal kaynaklara alternatif olması ile de sürdürülebilirlik bakımından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ana bağlayıcı madde olarak öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile farklı oranlarda metakaolin yer değiştirilerek kullanılmıştır. Agrega olarak ise geri dönüştürölmüş beton parçaları ince malzeme boyutunda öğütölüp alkali aktivatörler yardımı ile geopolimer numuneler üretilmiştir. Bu amaçla üretilen taze harçlarda, kıvam, birim hacim ağırlığı ve işlenebilirlik, sertleşmiş harçlarda ise yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme, eğilmede çekme dayanımları, basınç dayanımları ve kılcal geçirimsizlik gibi fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri tayin edecek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları ile bağlayıcı olarak kullanılan endüstriyel atık özelliklerinin ve bazı özellikleri iyileştirilmesi açısından kullanılan metakaolinin farklı harç karışımlarının özelliklerine ne seviyede katkıda bulunduğı saptanmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu çalışmada geopolimer harçların üretilmesinde metakaolin, granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır.

2.1. Metakaolin

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık olarak 500–800 °C arasındaki sıcaklıklarda kalsine edilmesi ile %14 oranında hidroksil suyunun yapıdan ayrılması ile elde edilen beyaz renkli yapay puzolanik bir üründür (Kostuch ve ark., 1993; Yazıcı ve ark., 2010). 100–200 °C civarında kil mineralleri bünyelerindeki iç sularını kaybederler. Kaolinit mineralinin 500 – 600°C arasında dehidrolize olarak suyunu kaybetmesi ile metakaolin oluşmaya başlamaktadır. Bazı araştırmacılara göre 600 °C ile 850 °C arasında kalsine edilen kaolin, amorf halde metakaoline dönüşür. Böylece aktive edilmiş ve yarı-kararlı hale gelen metakaolin çimento ve kireç ile reaksiyona girebilir. 900°C üzerinde ise kimyasal içeriği belirsiz olmakla birlikte spinel faz ve mülit, silikat minerali, oluşmaktadır. Mülit, puzolanik özelliğe sahip değildir (Gültekin, 2014). Literatüre göre ise 1100°C ve 1200°C arasında kristobalit kristalleşmeye başlamaktadır (Barness, 2001). Puzolan amacıyla çimento harcında ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı betonunda kullanılmıştır (Kandil, 2021).

Metakaolin yapısında oldukça fazla miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermektedir. Ortam sıcaklığında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girdiğinde kalsiyum silikat hidrat jeli meydana gelir ve C_4AH_{13} , C_2ASH_8 ve C_3AH_6 dâhil olmak üzere alümin içeren fazlar üretmek için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmektedir (Souri ve ark., 2015). Oluşan bu ürünler yardımıyla üretilen beton veya harçlarda mekanik özelliklerde ve dayanıklılıkta artma görülmektedir (Yazıcı ve ark., 2010). Son yıllarda metakaolin, hızlı dayanım kazanma ve alkali aktifleştirici çözeltilerle iyi oranda birleşme mekanizması oluşturması sayesinde, geopolimer beton ve harçlarda sık bir şekilde kullanılan bir bağlayıcı niteliğinde olmuştur (Mobili ve ark., 2016; Duan ve ark., 2016; Yang ve ark., 2017; Sun ve Vollpracht, 2018). Bazı araştırmacılar tarafından verilen metakaolin oksit analizleri Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Birbirinden farklı çalışmalarda kullanılan farklı tip metakaolinlerin kimyasal kompozisyon örnekleri

Oksitler	Khaled ve ark. (2023)	Chakkor ve ark. (2021)	Koçak ve ark. (2020)
SiO ₂	53.85	56.1	58.25
Al ₂ O ₃	29.70	40.23	20.03
Fe ₂ O ₃	1.30	0.85	0.46
CaO	0.51	0.19	9.71
MgO	0.15	0.16	1.54
K ₂ O	<0.01	0.51	0.92
SO ₃	0.20	<0.01	1.58
Na ₂ O	0.05	0.24	0.24

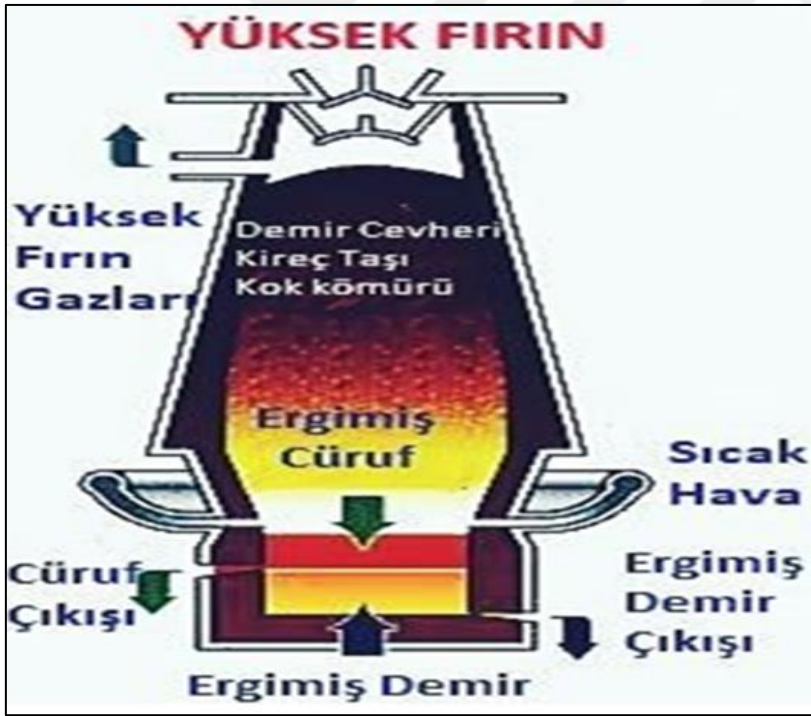
Witzke ve ark. (2023), sadece metakaolin bazlı geopolimer beton üreterek aşınma dirençlerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda ürettikleri metakaolin bazlı betonun Portland çimentolu betonların gösterdiği aşınma direnciyle aynı veya daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Bu sonucu ise geopolimer matrisin agrega ile oluşturduğu güçlü yapışmaya bağlamışlardır.

Jithendra ve ark. (2022), uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve silika ile geopolimer harç üreterek, harçların akışkanlığı ve basınç dayanımını incelemişlerdir. Sonuçlara göre metakaolinin ince partiküllerinin akışkanlığı iyileştirdiği ve bir dolgu maddesi görevi gördüğü, diğer taraftan çözeltinin molaritesindeki artışın akışkanlığı azalttığı ancak basınç dayanımında da artış gözlemlemişlerdir.

2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Saf demir doğada neredeyse hiç bulunmaz. Daha çok demirin demir oksit gibi diğer elementlerle birleşimi şeklinde bulunmaktadır. Saf demir elde etmek amacıyla ocaktan çıkarılan demir cevheri, Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi yüksek fırın diye adlandırılan fırınlarda yaklaşık 1400-1600 °C sıcaklıklarda ısıtılır. Yüksek sıcaklıklarda demiri bileşiklerinden arındırma işleminde yakıt olarak kok kömürü, katalizör olarak da kalker taşı

kullanılmaktadır (Siddique ve ark., 2011). Yüksek sıcaklık altında kömürde bulunan karbon ve demir oksitte bulunan oksijen birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarını meydana getirmektedir. Gazlar fırından dışarı atıldığında fırın içerisinde demir ve eriyik olarak yabancı maddeler (cüruf) kalır. Demirin yoğunluğunun cüruf yoğunluğundan fazla olması sebebiyle demir alt tabana inmekte, cüruf ise eriyik şekilde üste çıkmaktadır. Daha sonra cüruf ve eriyik haldeki demir farklı kollardan fırını terk etmektedir (Al-Hasan, 2023). Çıkan cüruf yavaş bir şekilde soğutulursa kristal bir yapıya sahip olur ve bazaltla benzer mekanik özellikler gösterir. Cürufun bu hali beton agregası olarak kullanılmaya uygundur. Eriyik halde karbonmonoksit, yüksek miktarda silisyum oksit ve alüminyum oksit gibi oksitleri içeren cüruf suda aniden hızlı bir şekilde soğutulunca elde edilen cüruf ile iri kum taneleri boyutunda amorf yapıya sahip granüle bir yapı ortaya çıkar. Granüle yapıdaki bu parçacıklar öğütülerek ince taneli bir hale getirilir. Öğütülmüş haldeki bu yüksek fırın cürufu puzolanik özellik göstermektedir (Erdoğan, 2003; Erdoğan, 2007; Yolcu, 2023).



Şekil 2.1. Yüksek fırın cürufunun oluşumunun şematik görünümü (URL-1, 2023)

Yüksek fırın cürufu, çimento ve beton endüstrisinde kendine yaygın uygulama alanı bulabilmektedir. Yüksek fırın cürufu puzolanik malzeme olarak kullanıldığında betonun işlenebilirliğini artırır, priz süresini uzatır; terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirgenliğini azaltır. İlaveten mekanik özellikleri iyileştirir, asidik ortamlarda dayanım sağlar ve sülfat

direncini arttırır (Dorum ve ark., 2009). Betona sağladığı bu avantajları sayesinde geopolimer için de uygun hammadde olarak çoğunlukla yüksek fırın cürufu tercih edilmektedir.

Aziz ve ark. (2020), yalnızca öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimerlerin mukavemet gelişimini araştırmışlardır. Sonuçlara göre katı/sıvı oranı 3, alkali aktivatör oranı 2,5 olan numunenin 28 günlük basınç dayanımı 168.7 MPa gibi yüksek bir değere ulaştığını belirtmişlerdir. İki farklı tip yüksek fırın cürufunu puzolan olarak kullanarak üretilen geopolimerde iki tip cürufunda geopolimerin fizikomekanik özelliklerinde önemli iyileştirmeler gerçekleştirdiğini vurgulamışlardır (Aziz ve ark., 2021). Daha fazla miktarda magnezyum içeren cürufun, daha fazla amorf faz ve mineral fazı oluşumunu desteklediğini belirtmişlerdir.

Gupta (2020), geopolimer betonun dayanım özelliklerini geliştirmek için birincil bağlayıcı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullandığı geopolimer betona silis dumanı ekleyerek deneysel çalışmalarda bulunmuştur. Farklı oranlarda bağlayıcı içerikleri ve alkali aktivatörlerle yaptığı çalışmada uyguladığı maksimum oransal değişiklik olan cüruf/silis dumanı oranı 0,40, alkali aktivatör oranı 2,5'te ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) maksimum mukavemeti yakalamıştır. Silis dumanı ile geopolimerin özelliklerinin geliştirilebileceği sonucuna varmıştır.

Sawarkar ve ark. (2023), alkali çözelti olarak sodyum silikat kullanarak yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer beton üretimi için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Numuneler ortam sıcaklığında kürlemişlerdir. Tek alkali kullanılarak da yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer üretilebileceği sonucuna varmışlardır. Kür süresine bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımlarının artacağını belirtmişlerdir. Ortam kürü yöntemi kullanılarak yeterli dayanıma sahip yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer üretilebileceği sonucunu elde etmişlerdir.

Marvila ve ark. (2023), yüksek fırın cürufu bazında kürleme tipinin, aktif alkali çimentonun mekanik özelliklerine etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Numuneler oda sıcaklığında normal kür, 65°C termal kür, distile su ile çözelti kürü (doymuş kür), hidrathlı kireç (kireç kürü) ile sodyum hidroksit (sodyum kürü) ve bileşik kürüne tabii tutulmuşlardır. En avantajlı kürlemenin termal ve sodyum kürlemesi olduğu sonucuna varmışlardır. Doygun ve kireç kürü gibi verimsiz kürlenme durumlarında, malzemenin mekanik özelliklerini bozan etrenjit ve çiçeklenmenin oluştuğunu belirtmişlerdir.

2.3. Uçucu Kül

Elektrik enerjisi üreten termik santrallerde yakıt olarak kullanılan taş kömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %20-50'si kül olarak meydana çıkmaktadır. Santrallerde yakılan bu kömürlerin bünyesindeki bazı mineral yanma sırasında kaynaşarak yukarıya doğru yükselir. Bu kaynaşmış malzeme zamanla soğuyarak küresel partiküller halinde sertleşir ve elektro filtreler aracılığı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenir. Çok aşırı küçük boyutlarda bu camsı yapıya sahip partiküller uçucu kül olarak bilinir. Uçucu kül, koyu gri renkte, oldukça ufak taneli bir malzemedir. Renginin koyu veya açık olması, elde edildiği kömüre ve yanış niteliğine bağlıdır. Yanmanın tamamen olmadığı durumda meydana gelen uçucu küle siyah renk veren içeriğinde bulunan yanmamış karbondur (Oğuz, 2019). İyi yanma neticesinde meydana gelen uçucu kül diğer uçucu küllere göre daha açık renktedir (Güler ve ark., 2005).

Ülkemizde 1 yılda neredeyse 45 milyon ton kömür yakılmakta ve bunun sonucunda 15 milyon ton civarlarında uçucu kül ortaya çıktığı görülmektedir (Güler ve ark., 2005). Açığa çıkan uçucu kül inşaat sektörü başta olmak üzere, seramik, tarım, kimya ve maden gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Fakat bu külün neredeyse %75'i atık olarak kalmaktadır. Bu oranı uçucu külün beton içerisinde kullanım miktarını arttırarak düşürebilsek ülkemiz için çok faydalı olacaktır. Betonda Portland çimentosunun yüksek hacimde uçucu kül ile birlikte ikame etmesi ile ilgili çalışmalar 1980'lerin sonlarından itibaren devam etmektedir (Berry ve ark., 1990; Feldman ve ark., 1990). Yüksek silisli ve alüminli olan bileşimi uçucu küle puzolanik özellik sağlamaktadır. İnce ve küresel taneciklere sahip olması da taze betonda işlenebilmeyi arttırmaktadır (Kandil, 2021). Uçucu kül, çimentonun hidratasyonu sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çimento harcına ekstra bağlayıcılık özelliği kazandırır; betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmektedir (Wu ve ark., 2002; Karahan ve Atiş, 2011). Nemli bir ortamda beton 100°C'nin üzerinde ısıya maruz bırakıldığında bu işlem hızlandırılabilir ve kalsiyum hidroksit miktarı yararlı bir şekilde hızla azalırken beton yapısını önemli ölçüde oluşturan kalsiyum silikat hidrat miktarı da artmaktadır. Bu sayede beton hızlı bir biçimde daha güçlü ve az geçirgen bir hale gelmektedir (Khoury ve ark., 2002).

Saha ve Rajasekaran (2017), uçucu kül bazlı geopolimeri sahada kullanmak amaçlamış fakat uçucu kül bazlı geopolimer ortam sıcaklığında geç sertleştiği öğütülmüş

yüksek fırın cürufu ile geopolimerin özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Ortam sıcaklığında %50'ye kadar öğütülmüş yüksek fırın cürufu ilavesinin ilk priz süresini %94, son priz süresini ise %92 oranında azalttığı sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde cürufun basınç dayanımını %50'den daha fazla arttırdığını belirtmişlerdir.

Görhan ve Kürklü (2023), uçucu kül bazlı geopolimer harçta metakaolin ikamesinde farklı kürleme sıcaklıklarının geopolimer özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Kürleme sıcaklığı arttıkça basınç dayanımlarında artış görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı ise 90°C'de 24 saat kürlenen numunelerde elde edilmiştir.

Karakaş ve ark. (2023), uçucu kül bazlı hafif geopolimer harç elde etmek için yaptıkları çalışmalarında agrega olarak dere kumunun yanında perlit de kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre su emme ve gözeneklilik değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca perlit kullanımı ile birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde de azalma görülmüştür. 900°C'lik yüksek sıcaklığa maruz bırakılan perlit agregalı geopolimer harç numunelerinde mukavemette artış görülmüştür.

2.4. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası

Beton; bağlayıcı malzeme, agrega, su ve gerektiğinde mineral ve kimyasal katkı maddelerinin hesaplar sonucunda elde edilen oranlarda homojen bir şekilde karıştırılması ile, ilk etapta plastik kıvamda olup zaman geçtikçe katılaşp istenilen şekli alan kompozit bir yapı malzemesidir (TS 802, 2009). Yirminci yüzyılın başından beri yapı sektörünün vazgeçilmez ve en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur. Avrupa Hazır Beton Birliğinden (ERMCO) alınan 2021 yılı verilerine göre ülkemiz beton üretiminde Avrupa'da lider konumdadır (THBB, 2022).

Beton sektörü bilimsel, mühendislik ve sosyal sorunlar açısından ele alındığında çevre, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik açısından sorunların devam ettiği görülmektedir. Genel manada, malzeme ve enerji kaynaklarının küresel ısınmaya veya doğal kaynak tüketimine sebep olacak şekilde savurgan tüketimi söz konusudur (Arioğlu ve ark., 2004).

Beton özelliklerinin beklenen değerleri sağlayabilmesi üretiminde kullanılan agrega karakteristiklerinin bazı şartları sağlaması ile mümkün olmaktadır (Özsöylev, 1993). Betonda kullanılabilir özellikte agrega kaynaklarının giderek azalması, tabii çevrenin bozulması, kirliliğin gözle görülür seviyede artması ve kaliteli agrega maliyetindeki artışlar, yeni arayışları meydana çıkarmıştır. Bu bağlamda atık betonların kırılarak geri dönüşüm

beton agregası olarak kullanılabilmesi, çevrenin korunması açısından oldukça önemli bir çalışmadır. Atık betonların geri dönüşüm agregası olarak kullanılması ve bunun halihazırdaki beton üretiminde uygulanabilirliği çevresel kirliliğin azalması açısından ciddi derece bir kazanım sağlayacaktır (Demirel ve Şimşek, 2014).

Saloni ve ark. (2021), geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen geopolimerin, düşük emisyonlu bağlayıcı maddelerle ve ultra ince cüruf kullanarak özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Tüm karışımlardan tatmin edici sonuçlar elde ettiklerini vurgulayan Saloni, en yüksek basınç dayanımını %100 geri dönüştürülmüş agrega ve %30 cüruf kullanımıyla elde ettiğini belirtmiştir. Genel olarak cürufun artışıyla geri dönüştürülmüş agregalı geopolimer betonun özelliklerinin iyileştiği kanısına varmıştır.

Tan ve ark. (2022), literatür incelemeleri sonucunda inşaat yıkıntı atıklarıyla üretilen geopolimerin çiçeklenmeye çok yatkın olduğu verisini elde etmişlerdir. Bunun üzerine çiçeklenme etkisini azaltmak için metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanarak etkisini araştırmışlardır. İki bağlayıcının da çiçeklenmeyi önemli ölçüde azalttığı fakat bu azaltmanın iki bağlayıcı açısından farklı mekanizmalara dayandığını vurgulamışlardır. Metakaolinin alkali girişi ve oluşunu azaltarak, öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ise gözenekliliği ve kılcal su girişini azaltarak çiçeklenmeyi önlediğini belirtmişlerdir.

Singh ve ark. (2023), geri dönüştürülmüş agrega ile en iyi mekanik performans ve eko-verimlilik sağlamak için öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı ile optimize oranda karışımlar üreterek geopolimer beton elde etmeyi araştırmışlardır. Sonuçlara göre en yüksek basınç dayanımını 52,15 MPa, eğilme dayanımını ise 5,81 MPa olarak bulmuşlardır. Performansın bu düzeyde iyi sonuç vermesinin sebebini geopolimer beton matrisinin yoğunluğuna ve CSH gibi jellerin oluşumunun artışına bağlamışlardır.

2.5. Alkali Aktivatör

Karbondioksitin sebep olduğu çevre kirliliklerini önlemek amacıyla hiç çimento kullanmadan veya en az oranda çimento kullanarak üretilen betona geopolimer beton denilmektedir. Çimento yerine bağlayıcılığı sağlamak için kullanılan puzolanları aktif hale getirebilmek için alkali aktivatörler kullanılmaktadır.

Alkali aktivasyon ile ilgili çalışmalar 1900'li yılların başlarında başlasada 1939 yılında Feret ve 1940 yılında Purdon'un cüruf üzerinde yaptıkları çalışmalarla tarihte alkali aktivasyon süreci önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Sertbakan, 2023). Son zamanlarda,

yapılan çoğu araştırmalar ve çalışmalar endüstriyel atık ürünleri ve doğal puzolanları alkali aktivatör ile aktifleştirerek çimentosuz veya az oranlarda çimentolu harç ve beton üretilebileceğini göstermiştir (Sarıdemir, 2016). Genel olarak alkalilerle aktive edilmiş imento ve betonlarda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfat, potasyum sülfat, kireç ve bunların kombinasyonu kullanılmaktadır (Aslan, 2022).

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, sadece imento ile üretilen betona göre;

- Daha yüksek erken dayanım değerleri,
- Daha düşük porozite yüzdesi,
- Daha düşük hidratasyon ısısı,
- Kimyasal etkilerle karşılaşıldığında daha iyi dayanıklılık,
- Donma çözölme etkisine karşı daha iyi dayanıklılık,
- Daha kuvvetli matris-agrega ara yüzeyi,
- Daha iyi geçirimsizlik gibi önemli avantajlar gösterir (Sarıdemir, 2016).

Alkali aktivatörlerin sebep olduğu bazı dezavantajlar da gerçekleşebilmektedir. Ani priz, işlenebilirlikte azalma, daha fazla mikro çatlak oluşumu, fazla büzölme ve daha fazla çiçeklenme gibi durumlar gerçekleşebilmektedir.

Bowen ve ark. (2022), farklı aktivatör/bağlayıcı oranının metakaolin bazlı geopolimerin özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. 0,15, 0,25 ve 0,35 aktivatör/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Oran arttıkça akışkanlık ve sertleşme süresinin arttığı gözlemlenmiştir.

Oyejobi ve ark. (2023), uçucu kül bazlı geopolimerlerin taze ve sertleşmiş harçların özelliklerine aktivatör/bağlayıcı oranının, sodyum hidroksit/sodyum silikat oranının ve sodyum hidroksit konsantrasyonunun etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuçlara göre optimal düzeyin üzerinde aktivatör/bağlayıcı oranı (0,60) basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. Tek başına NaOH yerine Na₂SiO₃ ile kullanımın daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

2.6. Geopolimerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Nüfus yoğunluğunun hızlı bir şekilde artması ile insanların barınma, ulaşım ve sanayi gibi alanlarda ihtiyaç duydukları yapıların çeşitliliği ve oranı da artmaktadır. Bu yapıların çoğunluğunda ise beton kullanılmaktadır. İşte sürekli artan beton talebi ana bağlayıcısı olan çimentoya talebi de arttırmaktadır. Üretimi esnasında çok fazla sera gazlarının atmosfere

salınması ve yüksek enerji ihtiyacından dolayı çimento çevreye büyük miktarda zararlar vermektedir. Bu amaçla çimentoya denk çevreye daha az zarar veren bağlayıcılar kullanılarak beton üretimini sağlamak son yıllarda araştırmacılar tarafından ilgi gören konulardan biri haline gelmiştir.

Geopolimerler alkali silikatlar veya puzolanik maddelerin alkaliler ile aktive edilmesiyle oluşur (Davidovits, 1991). Geopolimer betonlar, beton ile kıyaslandığında daha çevreci, sürdürülebilir ve atmosfere yayılan karbondioksit miktarını da düşüren, yüksek sıcaklıklarda mekanik performansı koruyabilen bununla birlikte çimento kullanılmadan veya çok düşük oranlarda kullanılarak üretilen bir betondur. Geopolimer beton bileşimleri hazırlanırken çimento yerine bağlayıcı olarak depolama alanı bakımından problem oluşturan ve endüstriyel atık malzeme olarak görülen puzolanik özellikleri bulunan malzemeler kullanılmaktadır. Bu puzolanik malzemelerin beton üretiminde kullanılmasıyla beraber çimento tüketim değerleri düşmüş olup hem ekonomik hem de çevreci betonlar üretilmeye başlanmıştır. Bununla beraber puzolan kullanımı betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini de iyi yönde etkileyerek daha üstün özellikli betonlar elde edilmesini sağlamıştır. Fakat mineral katkı maddeleri olan puzolanik malzemeler betonda tek başlarına kullanıldıkları takdirde bağlayıcılık özelliği göstermemektedirler (Olçay, 2022). Geopolimer betonlar çimento içermediklerinden puzolanları aktifleştirmek için alkali aktivatörler ile aktif hale getirilmekte ve bağlayıcılık sağlanmış olmaktadır (Şinik, 2019).

İlk olarak Purdon 1940 yılında makalesinde alkali aktivasyonlu cürufun, Portland çimentolu betonla karşılaştırıldığında daha yüksek mekanik özelliklere ve düşük su geçirgenliğine sahip olabileceğini göstermiştir (Kavazoğlu, 2021). Sonraki yıllarda bu çalışmayı Glukhovsky'nin çimentoya alternatif olarak eski uygarlıklardan o güne dek kullanılan bağlayıcıları incelediği çalışmalar ve kayaç ile kil minerallerinin alkali davranışında, katılaşma ürünleri olarak yeni bir sınıf zeolit-benzeri hidratları tanımladığı çalışmaları takip etmektedir. Geopolimer terimini ortaya atan Davidovits, geopolimerleri ilk olarak yer kabuğu yüzeyindeki oluşumlara benzer sentetik mineralleri tanımlarken kullanmıştır (Gülmez, 2018). 1978 yılında Davidovits, dolomit, kireçtaşı ve kaolin karışımlarının yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucunda ortaya çıkan alüminosilikat malzemeyi alkaliler ile aktive ederek ortaya çıkan bu yeni bağlayıcıya 'geopolimer' adını vermiştir. Benzer malzemeler için zamanla farklı isimler kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alüminosilikatlar, alkali aktive edilmiş çimentolar, alkali bağlı seramikler, inorganik polimer beton ve hidroseramik gibi isimler en çok kullanılan isimlerdendir (Yonar, 2014). Farklı

mühendislik faydaları sebebiyle, alkali ile aktif hale getirilmiş sistemler üzerine çalışmalar, 1980'lerden beri dünya genelinde artmaya başlamış, sonraki yıllarda da tüm dünyada çeşitli etkinlikler ve konferanslar düzenlenmiştir (Kavazoğlu, 2021).

2.7. Geopolimerin Kimyası

Geopolimerlerin yapısı, endüstriyel yan ürün olan alüminosilikat bağlayıcı maddeler ile alkali aktivatörler arasında düşük sıcaklıkta meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu oluşmaktadır. Alüminosilikatlar SiO_2 ve Al_2O_3 mineralleri bakımından zengin malzemelerdir. Bu malzemelerin yapısında kovalent bağlarla bağlı mineraller, molekül, zincir veya ağlar alkali çözeltilerle yüksek sıcaklıklar sayesinde hızlıca çözünmektedir. Bu çözünme sonucunda serbest halde SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral yapıları oluşmaktadır. Reaksiyon ilerledikçe bu yapılar oksijen atomlarıyla bağlanarak Si-O-Al polimerik bağını meydana getirmektedir. Bu şekilde tepkimelerle meydana gelen bir dizi polimerleşme reaksiyonları 'geopolimerizasyon' olarak adlandırılmaktadır (Sevinç, 2021). Geopolimerizasyon ekzotermik bir reaksiyondur.

Geopolimerizasyon yapı aşamaları alüminyum ve silisyum tanelerinin çözünme, taşınma ve polimerizasyon adımlarından meydana gelmektedir. Yapının oluşum ve sertleşme reaksiyon mekanizması net olarak anlaşılamasa da ortaya çıkan malzemenin özelliklerinin hammaddenin yanında alkali aktivatör türüne ve ısı kürü ile süresine bağlı olduğu da düşünülmektedir.

2.8. Geopolimerin Fiziksel, Kimyasal ve Durabilite Özellikleri

Li ve Li (2018), uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren geopolimer betonun karbonatlaşma değerleri üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu arttıkça karbonatlaşma değerinin düştüğü, bunun öğütülmüş yüksek fırın cürufunun dayanıma katkısıyla alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Cürufun inceliğinin artması da karbonatlaşmayı azaltan etkenlerden olduğu çalışmanın sonuçları arasındadır. Benzer şekilde ısı ile kürlemenin de karbonatlaşma derinliğini azalttığını belirtmişlerdir.

Çelikten ve Erdoğan (2022), uçucu kül bazlı yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklık ile kütle ve mukavemet kaybı ile mikro yapılarda değişiklikler ortaya çıkmıştır. 800°C 'ye

maruz kaldıktan sonraki eğilme basınç değerleri, 600°C'ye maruz kalan numune değerlerinden yüksek olmuştur. 800°C'ye maruz bırakılan harçlarda yeni kristal fazlar tespit edilmiştir.

Zhang ve ark. (2023), metakaolin bazlı elyaf takviyeli geopolimer kompozitlerin 140°C'ye kadar sıcaklık artışı ile basınç dayanımının arttığını fakat 200°C'de elyafın erimesiyle oluşan boşluklar sebebiyle çatlakların meydana gelerek basınç dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte maruz kalınan sıcaklık 400°C'yi aştığında çatlakların artarak mukavemeti olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Eğilme dayanımı da benzer davranış göstermiştir.



3. MATERİYAL ve METOT

Çalışmada farklı karışım yüzdeleri kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde bağlayıcı faktörünün etkisini incelemek amacıyla fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri tayin edecek deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

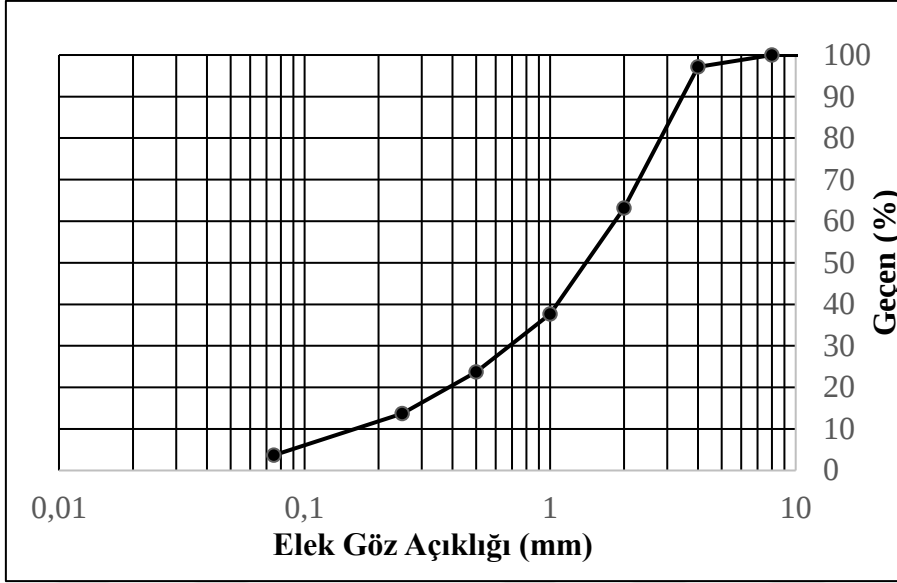
3.1.1. Agregat

Bu çalışmada harç üretiminde agrega olarak Resim 3.1.'de gösterildiği üzere Elâzığ İli Abdullahpaşa Mahallesi'nde yıkılan bir binadan toplanan beton parçaları ince malzeme boyutunda (2-0,063 mm aralığında) çeneli kırıcıda öğütülmüştür.



Resim 3.1. Elâzığ İli Abdullahpaşa Mahallesi'nde agregaların toplandığı moloz alanı

Agreganın elek analizi, TS 130'a göre yapılmış ve gradasyon eğrisi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının gradasyon eğrisi

Bileşenler için özgül ağırlık tayini ASTM C188-95'e göre Balon Joje yöntemiyle yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, özgül ağırlık değeri belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregasının özgül ağırlığı 2,74'tür. Agreganın gevşek ve sıkışık birim ağırlıkları ise ASTM C29-97'ye göre belirlenmiş ve sırasıyla 1,56 ve 1,63 g/cm³ olarak bulunmuştur.

3.1.2. Bağlayıcı

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan metakaolin, AVS İç ve Dış Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir ve özgül ağırlığı 2,6'dır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu Elâzığ Eti Krom A. Ş.'den sağlanmış; F sınıfı olan uçucu kül ise İskan Termik santralinden temin edilmiştir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün özgül ağırlıkları ASTM C188-95'e göre tayin edilmiş olup, sırasıyla 3,15 ve 2,34'tür. Bağlayıcıların görselleri Resim 3.2.'dedir ve kimyasal kompozisyonları ise Tablo 3.1.'de verilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Resim 3.2. a) Metakaolin; b) Öğütülmüş Yüksek fırın cürufu; c) Uçucu Kül

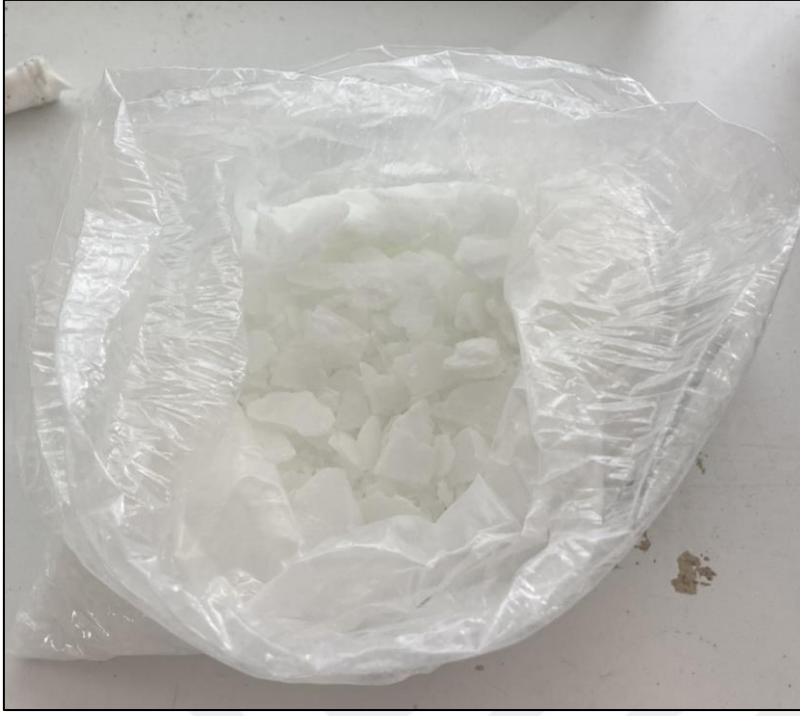
Tablo 3.1. Bu çalışmada kullanılan bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları

Oksit	Metakaolin	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül
SiO ₂	53,00	30,99	60,94
Al ₂ O ₃	43,00	25,22	20,66
Fe ₂ O ₃	0,50	1,06	7,95
CaO	0,50	0,92	2,32
MgO	0,40	36,66	-
K ₂ O+Na ₂ O	0,55	-	1,56
SO ₃	-	0,15	0,11
TiO ₂	1,00	-	-
Cl ⁻	-	-	0,10
Kızdırma kaybı	2,00	1,49	1,92

3.1.3. Alkali Aktivatör

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır.

NaOH pelet halinde olup görseli Resim 3.3.'te verilmiştir. NaOH'ın moleküler ağırlığı 40 g/mol'dür. Sodyum hidroksit peletlerinin saf su içerisinde çözünmesiyle, 10 molar konsantrasyonda sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti 24 saat boyunca dinlendirildikten sonra özgül ağırlığı 1,18 olarak bulunmuştur.



Resim 3.3. NaOH'ın pelet olarak görünümü

Na_2SiO_3 için kimyasal değerler ise $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=3,13$, $\%\text{Na}_2\text{O}=9,22$, $\%\text{SiO}_2=28,87$ olarak verilmiştir. Sodyum silikatın özgül ağırlığı 1,33'tür.

Karışımında kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit:3 (hacimsel olarak) alınmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar

3.2.1. Çeneli kırıcı

Geri kazanılmış agrega elde etmek için Elâzığ İli Abdullahpaşa Mahallesi'nde depremde ağır hasar görmüş bir binanın molozlarından alınan Resim 3.4.'teki beton parçaları, Elâzığ İli Karayolları laboratuvarlarında bulunan çeneli kırıcı ile kırılıp 0-4 mm aralığına getirildikten sonra istenilen aralık olan 0.063-2 mm aralığına getirmek için laboratuvar ortamında elekler kullanılmıştır. Kullanılan çeneli kırıcı Resim 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.4. Çeneli kırıcı

3.2.2. Elek

Agregaların elek analizi tayini ve geopolimer harç karışımlarında kullanılacak agregaları elde etmek amacıyla kırıcıda kırılan agregalar Resim 3.5.'teki Yüksel Kaya Makine markalı elek sarsma cihazı ve elekler yardımıyla elenerek kullanılmıştır.



Resim 3.5. Sarsma cihazı ve elekler

3.2.3. Hassas Terazi

Karışımların hazırlanması için ölçümler Resim 3.6.'da görülen 0.1 g hassasiyetli terazi yardımıyla yapılmıştır.



Resim 3.6. Deneylerde kullanılan hassas terazi

3.2.4. Harç Karıştırma Mikseri

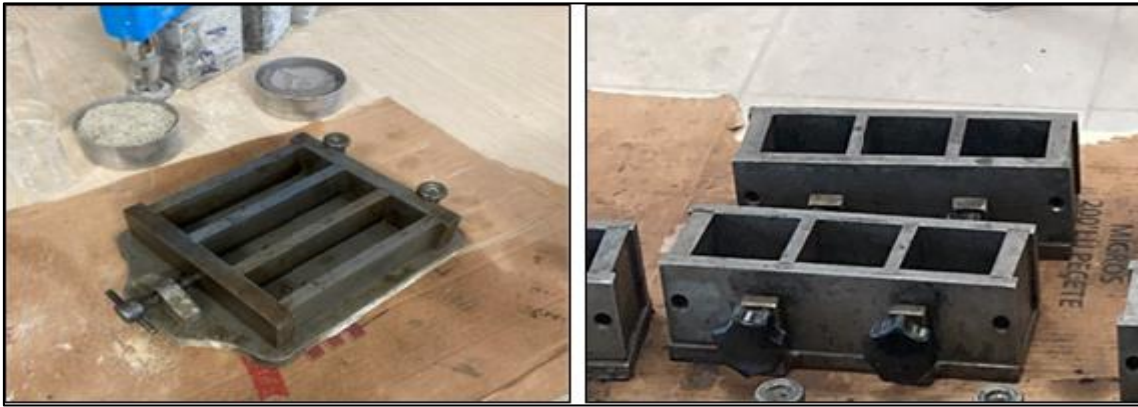
Harç karışımlarını hazırlamak için UTEST markalı Resim 3.7.'de görülen harç karıştırma mikseri kullanılmıştır.



Resim 3.7. Harç karıştırma mikseri

3.2.5. Çelik Kalıplar

Üretilen geopolimer harç numuneleri yerleştirmek için Resim 3.8.'de görülen 40x40x160 mm ayrıtlı prizmatik çelik kalıp ve Şekilde görülen 50x50x50 mm ayrıtlı küp çelik kalıplar kullanılmıştır.



(a)

(b)

Resim 3.8. a) Dikdörtgen prizma kalıp; b) Küp kalıp

3.2.6. Yayılma Tablası

Hazırlanan karışımların kıvamları hakkında bilgi vermesi için Resim 3.9.'daki gibi yayılma tablası ile deney yapılmıştır.



Resim 3.9. Yayılma tablası

3.2.7. Sarsma Tablası

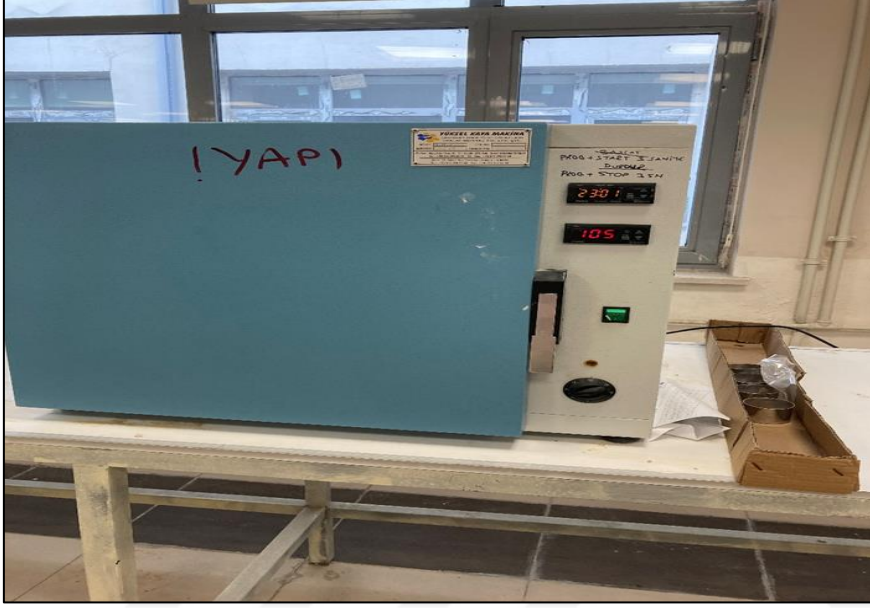
Çeşitli karışım oranlarına sahip harçları kalıplara yerleştirme sırasında gerekli olan vibrasyonun sağlanması için Resim 3.10.'da gösterilen Yüksel Kaya Makine marka sarsma tablası kullanılmıştır.



Resim 3.10. Sarsma tablası

3.2.8. Etüv

Agrega ve numunelerin su emme tayinin yanı sıra numuneleri 100°C’de kür etmek amacıyla Resim 3.11.’de gösterilen ve sıcaklığı 105°C’ye kadar çıkabilen Yüksel Kaya Makina markalı etüv kullanılmıştır.



Resim 3.11. Etüv

3.2.9. Eğilme ve Basınç Dayanımı Test Cihazı

Geopolimer harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının tayini için Resim 3.12.’de gösterilen BESMAK marka cihaz kullanılmıştır.



Resim 3.12. Eğilme ve basınç dayanımı test cihazı

3.2.10. Arşimet Terazisi

Su emme ve boşluk oranının tayini için harç numuneler Resim 3.13.'te gösterilen Arşimet terazisinde deneye tabi tutulmuştur.



Resim 3.13. Arşimet terazisi

3.3. Geopolimer Harçların Üretimi (Karışım Tasarım Yöntemi)

Üretilen karışımlarda ön denemeler sonucunda esas bağlayıcı olarak hem öğütülmüş yüksek fırın cürufu hem de uçucu kül kullanılmıştır. İkincil bağlayıcı olarak metakaolinin yine ön denemeler sonucunda toplam bağlayıcı miktarının %5 ve %10' kadar kullanılmasına karar verilmiştir. 1 dm³ e göre tasarlanan geopolimer harçların karışıma giren malzemelerin her birinin hacminin kendi yoğunluğu ile çarpılmasıyla kütleleri bulunmuştur ve 0,1 g hassasiyetli terazi yardımıyla hazırlıkları yapılmıştır.

Karışım aşamaları şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Mikserin karıştırma kabına konulan geri dönüştürülmüş beton agregasının üzerine NaOH peletlerinin saf su içerisinde çözünmesiyle elde edilen 10M konsantrasyondaki NaOH çözeltisi ve likit haldeki Na₂SiO₃ birlikte ilave edilerek 2 dakika boyunca mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra bağlayıcılar (yüksek fırın cürufu, metakaolin ve/veya uçucu kül) karışıma dahil edilerek toplamda 5 dakika boyunca mikser çalıştırılmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları Tablo 3.2.'de verilmiştir. Serilerin hepsinde aşağıdaki özellikler sabit tutulmuştur.

Sodyum hidroksit konsantrasyonu: 10 M

Sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı: 1/3 (hacimsel olarak)

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı: 1,2 (hacimsel olarak)

Agrega olarak sadece geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılmıştır.

Hazırlanan karışımlar 24 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıptan çıkartılarak 72 saat boyunca etüvde 100 °C'de etüv kürüne tabi tutulmuştur.

Tablo 2.2. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm³)

Seri Kod	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Bağlayıcı Cüruf	Bağlayıcı Uçucu Kül	Metakaolin	Atık Beton Agregası
Y	225	75	250	-	-	450
YM1	225	75	237,5	-	12,5	450
YM2	225	75	225	-	25	450
YU1	225	75	187,5	62,500	-	450
YMU1	225	75	178,125	59,375	12,5	450
YMU2	225	75	168,75	56,250	25	450
YU2	225	75	125	125	-	450
YMU3	225	75	118,75	118,75	12,5	450
YMU4	225	75	112,5	112,5	25	450
YU3	225	75	62,5	187,5	-	450
YMU5	225	75	59,375	178,125	12,5	450
YMU6	225	75	56,25	168,75	25	450
U	225	75	-	250	-	450
UM1	225	75	-	237,5	12,5	450
UM2	225	75	-	225	25	450

Y Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak sadece öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır

YM1 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %5 oranında yer değiştirilmiştir.

YM2 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %10 oranında yer değiştirilmiştir.

YU1 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ile hacimce %25 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU1 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %5 ve uçucu kül ile %23,75 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU2 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %10 ve uçucu kül ile %22,5 oranında yer değiştirilmiştir.

YU2 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ile hacimce %50 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU3 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %5 ve uçucu kül ile %47,5 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU4 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %10 ve uçucu kül ile %45 oranında yer değiştirilmiştir.

YU3 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ile hacimce %75 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU5 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %5 ve uçucu kül ile %71,25 oranında yer değiştirilmiştir.

YMU6 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ile hacimce %10 ve uçucu kül ile %67,5 oranında yer değiştirilmiştir.

U Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak sadece uçucu kül kullanılmıştır.

UM1 Karışım Serisi: Bağlayıcı madde olarak kullanılan uçucu kül, metakaolin ile hacimce %5 oranında yer değiştirilmiştir.

UM2 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan uçucu kül, metakaolin ile hacimce %10 oranında yer değiştirilmiştir.

3.3. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Taze harçlar üzerinde kıvam tayini ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

3.3.1. Taze harç kıvam tayini

TS 1015-3'e göre, taze harçların kıvam tayini üretimden hemen sonra yapılmıştır. Deneyler bütün seriler için ayrı ayrı yapılmıştır.

Kesik koni şeklindeki kalıp, dairesel şekildeki yayılma tablasının merkezine yerleştirilip harç 2 tabaka halinde doldurulmuştur. Her tabaka farklı yerlerden şiş yardımıyla 10 kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalıbın yayılma tablası merkezinden kaymamasına dikkat edilmelidir. Kalıp üzerindeki fazla harç palet bıçağı ile sıyrılıp alınmıştır. Tablada kalıp dışında kalan yerler bir bezle temizlendikten sonra koni kaldırılmıştır. Daha sonra yayılma tablasının kolu saniyede 1 defa olacak şekilde döndürülerek 15 kez düşüş gerçekleştirilmiştir. Yayılan harcın çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülmüş, bu iki ölçümün aritmetik ortalaması alınarak raporlanmıştır.

$$D_{ort} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de geçen ifadeler;

D_{ort} : Ortalama çap

D_1, D_2 : Taze betonun birbirine dik iki doğrultuda ölçülen yayılma çapları

3.3.2. Taze harcın birim hacim ağırlığı

İlk olarak sabit hacimli boş bir kap tartılarak ağırlığı bulunmuştur. Kabın hacmini hesaplamak için kap üst yüzeyi sıfırlanacak şekilde su ile doldurularak tekrar tartılmıştır. Gerekli işlemler yapılarak kabın hacmi hesaplanmıştır. Daha sonra hazırlanan her harç serisinde aynı şekilde olmak üzere, kap 3 defada doldurularak ve her defasında düz bir yüzeye tabanı birkaç kez vurulup sıkıştırmadan boşlukları da harç ile doldurup elektronik tartıda tartılmıştır. Sonuçlardan boş kabın ağırlığı çıkarıldıktan sonra kabın hacmine bölünmüştür. Eşitlik 3.2’deki denklem ile taze harçların birim hacim ağırlığı değerleri hesaplanmıştır.

$$\rho_{tbha} = \frac{(M_{kap} + \text{harç} - M_{kap})}{V_{kap}} \quad (3.2)$$

Burada;

ρ_{tbha} : Taze harcın birim hacim ağırlık, (g/cm³)

$M_{kap+harç}$: Harç karışımı ile dolu kabın ağırlığı, (g)

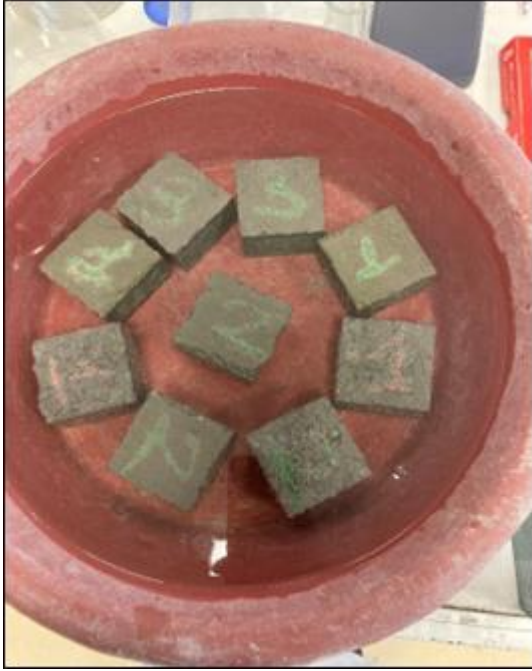
M_{kap} : Kabın ağırlığı, (g)

V_{kap} : Kabın hacmi (cm³) ifade etmektedir.

3.4. Sertleşmiş Harçların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite

Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite ASTM C 642-06 standardına uygun olarak hesaplanmıştır. 50x50x50 mm'lik küp numuneler 72 saat boyunca 100°C'lik etüv kürüne tabii tutulmuşlardır. Bu sürenin ardından etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldiklerinde hassas terazide tartılarak kuru ağırlıkları bulunmuştur. Sonrasında 20-25°C'lik su dolu kabın içerisine Resim 3.15. a)'daki gibi numunelerin bütün yüzeyleri suyun içinde kalacak şekilde yerleştirilerek 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda sudan çıkarılan numunelerin fazla suyu temiz bir bez yardımıyla alınarak hassas terazide tartılmışlardır. Resim 3.14. b)'deki görülen ve Arşimet terazisi olarak adlandırılan terazinin su dolu kova içerisindeki tel sepetine daldırılan numunelerin sudaki ağırlıkları da ölçülmüştür. Eşitlik 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'ya göre tüm numuneler için değerler hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Resim 3.14. a) 24 saat suda bekletilen numune örnekleri; b) Arşimet terazisi yardımıyla numunelerin suya doygun kuru yüzey ağırlık ölçümü

Aşağıdaki eşitliklere göre tüm numuneler için değerler hesaplanmıştır.

$$\text{Yığın yoğunluk (KURU)} = \frac{M_{\text{kuru}}}{M_{\text{sdyk}} - M_{\text{suda}}} \quad (3.3)$$

$$\text{Yığın yoğunluk (DYK)} = \frac{M_{\text{sdyk}}}{M_{\text{sdyk}} - M_{\text{suda}}} \quad (3.4)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{M_{\text{sdyk}} - M_{\text{kuru}}}{M_{\text{kuru}}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = \frac{M_{\text{sdyk}} - M_{\text{kuru}}}{M_{\text{sdyk}} - M_{\text{suda}}} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada;

M_{kuru} : Numunenin kuru ağırlığı

M_{sdyk} : Numunenin suya doygun kuru yüzey ağırlığı

M_{suda} : Numunenin sudaki ağırlığı

3.5.Sertleşmiş Harçların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

72 saat boyunca 100°C'lik ısı kürüne tabii tutulan sertleşmiş harç numunelerinin eğilmede çekme ve basınç dayanımları TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyi, Resim 3.15.'de gösterildiği gibi 40x40x160 mm'lik prizma numunelere 0,5 kN/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Her seriden 2 adet numune kırılmıştır. Kırılan numunelerin her bir parçası basınç dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi ise 1 kN/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır.



Resim 3.15. Eğilmede çekme deneyi

Eğilmede çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$R_f = 1,5 \frac{F_f \times L}{b^3} \quad (3.7)$$

Burada;

R_f : Eğilmede çekme dayanımı, MPa

F_f : Uygulanan yük, N

L : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm

b : Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu

Basınç dayanımı ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.8)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı, MPa

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, N

A : Yükleme plakalarının alanı (40mmx40mm), mm²

3.6. Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

3.6.1. Kılcal geçirimlilik

24 saat 100°C etüvde kurutulmuş 50x50x50 mm'lik küp numuneler etüv kurusu ağırlıkları tartılmıştır. Dört tarafı silikon ile kaplanıp kurutulduktan sonra da numunelerin ağırlıkları alınarak Resim 3.16.'daki gibi alt yüzeylerinden su ile temas edecek şekilde kılcal su emme deneyine tabii tutulmuştur. Kılcal yolla emilen su miktarları 24 saat sonunda, numuneler tartılarak ölçülmüştür.



Resim 3.16. Kılcal geçirimlilik deneyi için hazırlanan numunelerin bırakıldığı düzenek

Kılcal su emme katsayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Gülmez, 2018).

$$k_c = \left(\frac{Q}{A} \right) \times \sqrt{t} \quad (3.9)$$

Burada;

k_c : Kılcal su emme katsayısı, cm²/sn

Q : t zaman aralığında emilen su miktarı, cm³

A : Kılcal su emme yüzey alanı, cm²

t : Ölçüm aralığı, sn

4. BULGULAR

Bağlayıcı tipi ve içeriğini kapsayan parametreler tezin bundan sonraki kısımlarında “BT” olarak kodlanacaktır.

4.1. BT’nin Yayılma Çapı ve Birim Hacim Ağırlığı Üzerindeki Etkisi

İşlenebilirlik; taze betonda homojenliği kaybetmeden karıştırılabilme, taşınma yerleştirme, sıkıştırılma ve yüzeyinin düzeltilmesi işlemlerinin kolaylıkla yapılabilmesini ifade etmektedir. Bu çalışmada hazırlanan harçların işlenebilirliği hakkında bilgi sahibi olmak için kıvam ve birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır.

Tüm harç serilerine ait yayılma çapı ve birim hacim ağırlığı değerleri Tablo 4.1.’de verilmiştir. Yayılma çapı en yüksek olan seri 18,15 cm ile YMU5 serisidir. Bu serinin oranları toplam bağlayıcı miktarının %5’i metakaolin geri kalanın ise %75’i uçucu kül %25’i ise öğütülmüş yüksek fırın cürufudur. Yayılma çapı en düşük olan seri toplam bağlayıcı miktarının %5’i metakaolin %95’i öğütülmüş yüksek fırın cürufu olan YM1 serisidir. Sonuçlar, uçucu kül oranı fazla olan serilerin öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranı fazla olan serilere göre daha akışkan bir kıvamda olduğunu göstermektedir. Uçucu kül ile öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranının %50 olmasından itibaren yayılma çapı %5 metakaolin ilavesiyle artış göstermiştir.

Yazıcı (2020), yaptığı tez çalışmasında esas bağlayıcı olarak uçucu külü kullanmış, ikincil bağlayıcı olarak kullandığı yüksek fırın cürufunu %10, 20, 30, 40 ve 50 değerlerinde uçucu küle yer değiştirmiştir. Sonuçlara göre yüksek fırın cürufu oranının artmasıyla yayılma çapının 200 mm’den 165 mm’ye kadar azaldığını raporlamıştır.

Shilar ve ark. (2023), geopolimer beton üretiminde yüksek fırın cürufunu % 0 ile % 40 arasında değişen %10'luk aralıklarla metakaolin ile kısmen yer değiştirmişlerdir. Yaptıkları sıkıştırma deneyi sonucunda sıkıştırma faktörünün yüksek fırın cürufu oranı arttıkça azaldığı, Ve Be deneyi sonucunda ise betonun kaba dolma süresinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu deneylerden anlaşılabacağı üzere yüksek fırın cürufu oranı arttıkça geopolimer betonun işlenebilirliği azalmıştır.

Tablo 3.1. Tüm serilerin yayılma çapları ve birim hacim ağırlıkları

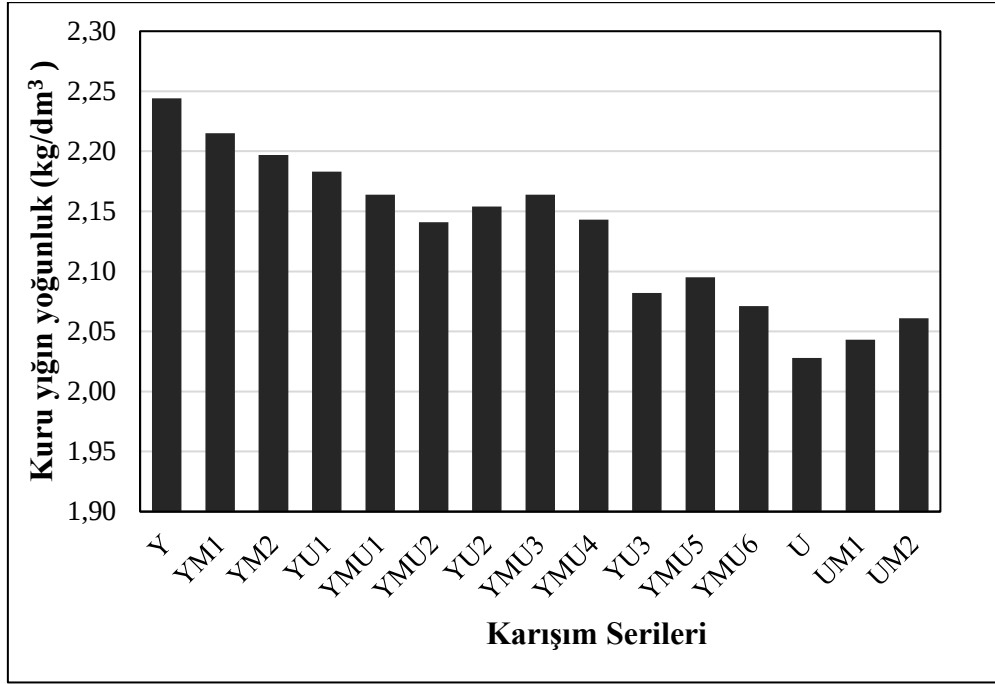
Seri Kod	Yayılma Çapı (cm)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Y1	9,85	2008
YM1	9,6	1698
YM2	10,25	1512
YU1	11,1	1753
YMU1	10,9	1616
YMU2	10,35	1439
YU2	14,9	2249
YMU3	15,75	2315
YMU4	11,7	1858
YU3	16,6	2286
YMU5	18,15	2284
YMU6	12,85	1911
U1	13,7	2168
UM1	16,75	2218
UM2	16,7	2260

4.2. BT'nin Yığın Yoğunluklar Üzerine Etkisi

Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere en düşük kuru yığın yoğunluk değerleri uçucu kül oranının artmasıyla elde edilmiştir. En düşük kuru yığın yoğunluk değerleri sırasıyla U serisi, %100 uçucu kül içeren numuneler, 2,03 kg/dm³, UM1 serisi, %95 oranında uçucu kül ve %5 oranında metakaolin içeren numuneler, 2,04 kg/dm³ ve UM2 serisi, %90 oranında uçucu kül ve %10 oranında metakaolin içeren numuneler, 2,06 kg/dm³'tür. Yalnızca uçucu kül kullanımı ile metakaolin artışının kuru yığın yoğunluğu arttırdığı gözlemlenmiştir.

Yalnızca uçucu kül ve metakaolin içeren serilere kadar ise bir dalgalanma mevcuttur. Bu dalgalanmada ise en yüksek sonuçlar %5'lik metakaolin içerikli numunelere aittir. YU2, YMU3 ve YMU4 serilerinin kuru yığın yoğunluk değerleri sırası ile 2,15, 2,16 ve 2,14 kg/dm³'tür. YU3, YMU5 ve YMU6 serilerinin kuru yığın yoğunluk değerleri ise sırasıyla 2,08, 2,10 ve 2,07 kg/dm³'tür.

En yüksek kuru yığın yoğunluk değeri Y serisine aittir ve $2,24 \text{ kg/dm}^3$ 'tür. YU2 serisine kadar öğütülmüş yüksek fırın cürufunun oranının azalması ile kuru yığın yoğunluk değerleri düzgün ve sürekli bir azalma eğilimi göstermiştir. YM1, YM2, YU1, YMU1 ve YMU2 serilerinin kuru yığın yoğunluk değerleri sırası ile 2,22, 2,20, 2,18, 2,16 ve $2,14 \text{ kg/dm}^3$ 'tür.



Şekil 4.1. Tüm serilerin kuru yığın yoğunluk değerleri

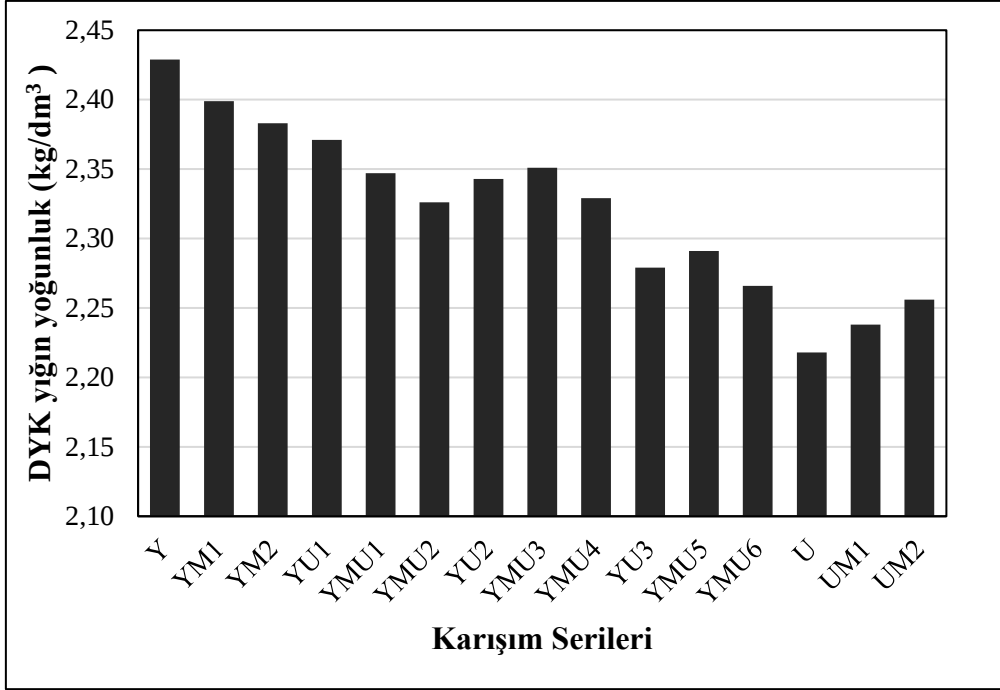
Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi numunelerin DYK yığın yoğunluk değerleri kuru yığın yoğunluk ile benzer davranışı göstermişlerdir.

Y, YM1 ve YM2 serilerinin DYK yığın yoğunluk değerleri sırasıyla 2,43, 2,40 ve $2,38 \text{ kg/dm}^3$ 'tür.

YU1, YMU1 ve YMU2 serilerinin DYK yığın yoğunlukları sırası ile 2,37, 2,35 ve $2,33 \text{ kg/dm}^3$ 'tür

YU2 serisinde dalgalanma başlamıştır. YU2, YMU3 ve YMU4 serilerinin DYK yığın yoğunluk değerleri sırası ile 2,34, 2,35, $2,33 \text{ kg/dm}^3$ 'tür Benzer şekilde aynı dalgalanma YU3 serisi ile devam etmektedir. YU3, YMU5 ve YMU6 serilerinin DYK yığın yoğunluk değerleri 2,28, 2,29 ve $2,27 \text{ kg/dm}^3$ 'tür

Yalnızca uçucu kül kullanımı ile birlikte tekrar bir artış eğilimi başlamıştır. U, UM1 ve UM2 serilerinin DYK yığın yoğunluk değerleri sırası ile 2,22, 2,24 ve $2,26 \text{ kg/dm}^3$ 'tür.



Şekil 4.2. Tüm serilerin DYK yığın yoğunluk değerleri

4.3. BT'nin Su Emme Üzerine Etkisi

En yüksek su emme değeri UM1 serisine aittir ve % 9,55'tir. Diğer en yüksek değerlere sahip olan YU3, YMU5, YMU6, U ve UM2 serilerinin su emme yüzdeleri sırasıyla %9,46, 9,34, 9,43, 9,39 ve 9,45'tir.

%50 oranından daha fazla uçucu kül kullanımı Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi su emmeyi arttırmıştır. Uçucu küllü seriler tüm serilere oranla daha yüksek su emme yüzdesine sahip olmakla birlikte lineer bir ilişki söz konusu değildir.

En düşük su emme yüzdesine sahip seri %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren Y serisidir ve değeri % 8,19'dur. YMU1 serisine kadar bir artış eğilimi mevcuttur ve YM1, YM2 ve YU1 serilerinin su emmeleri sırasıyla % 8,40, 8,51 ve 8,63'tür.

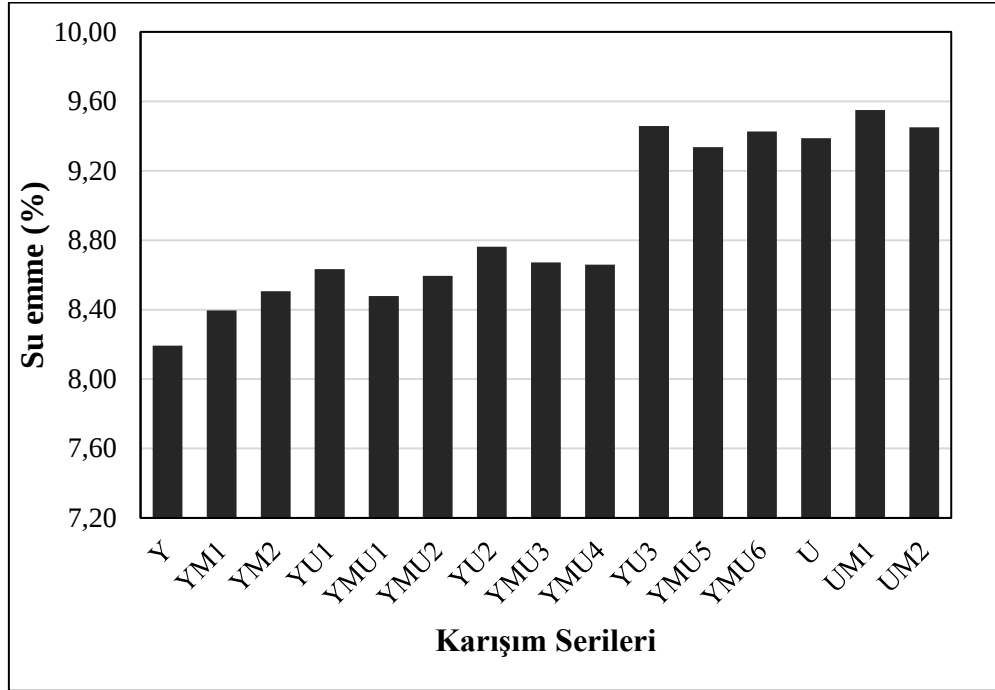
YMU1 ve YMU2 serilerinin su emmeleri sırasıyla % 8,49 ve 8,60'tır.

YU2, YMU3 ve YMU4 serilerinin su emmeleri ise sırasıyla %8,76, 8,67 ve 8,66'dır.

Metakaolinin su emme üzerinde davranışı seriler ve yüzdeleri arasında değişkenlik gösterdiği için yorumlamak güçleşmiştir.

Öz ve ark. (2023), kısa kürleme süresinde (8 saat) üretilen klinker agregalı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve metakaolin bazlı geopolimer betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Ortam (25°C) ve etüv kürü (80°C) olmak üzere iki kürleme yöntemi kullanılmıştır. Isı kürü uygulaması karışımların su emme, birim ağırlık ve

gözeneklilik değerlerini düşürmüştür. Ortam kürüne maruz kalan numunelere kıyasla ısı kürüne maruz kalan numunelerin basınç dayanımları daha yüksektir.



Şekil 4.3. Tüm serilerin su emme yüzdeleri

4.4. BT'nin Görünür Porozite Üzerine Etkisi

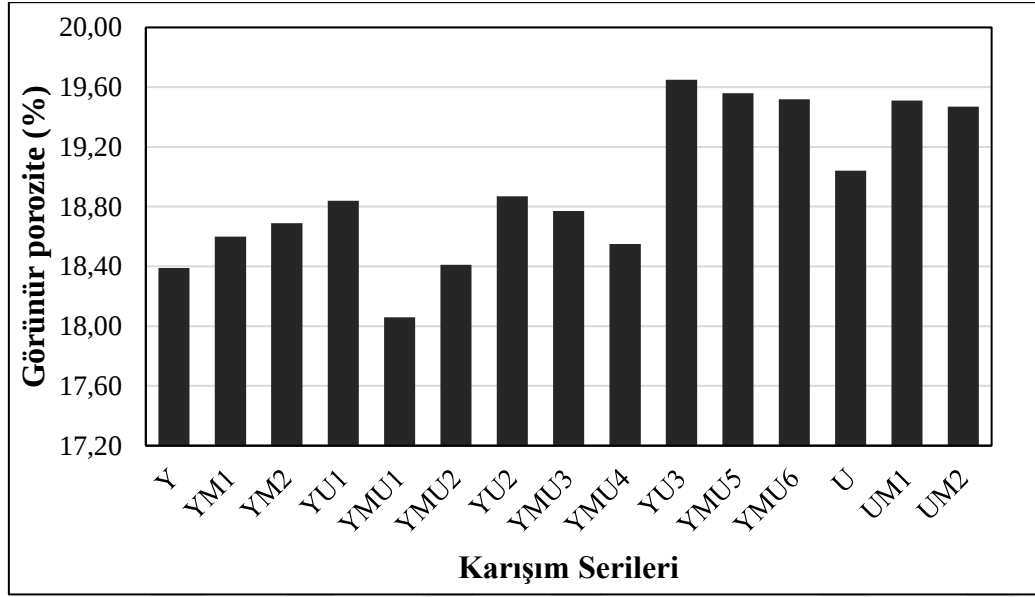
Numunelerin porozite yüzdeleri bize numunenin boşluk hacmiyle ilgili yorumda bulunmamıza konusunda yardımcı olmaktadır. İç boşlukların artması betonun kırılma çizgisi boyunca daha kolay boşluklu yol izleyerek kırılmasına sebep olmaktadır.

Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi serilerden en düşük porozite değerine sahip olan YMU1'dir. Bu değer %18,06'dır. YMU1'e kadar olan serilerin porozite değerlerinde düzgün bir artış mevcuttur. Y serisinin porozite değeri %18,39, YM1'in %18,60, YM2'nin %18,69 ve YU1'in %18,84'tür. Tekrar yaşanan yükseliş ve alçalış değerleri ise şöyledir: YMU2 %18,41, YU2 %18,87, YMU3 %18,77 ve YMU4 %18,55'tir.

YMU4 serisinden sonra ani bir yükseliş ile en yüksek poroziteye sahip olan seri ise YU3 serisidir ve değeri %19,65'tir. YMU5, YMU6 ve U serilerinin porozite değerlerinde az da olsa bir düşüş olmuştur. Bu serilerin porozite değerleri sırası ile %19,56, %19,52 ve %19,04'tür. UM1 serisinin porozite değerinde tekrar bir artış gerçekleşmiş ve %19,51 değerine ulaşmıştır. UM2 serisinin porozite yüzdesi ise %19,47'dir. Serilerde uçucu külün

%50'den daha fazla oranda olmasıyla birlikte porozite değerlerinde ciddi artışlar meydana gelmiştir.

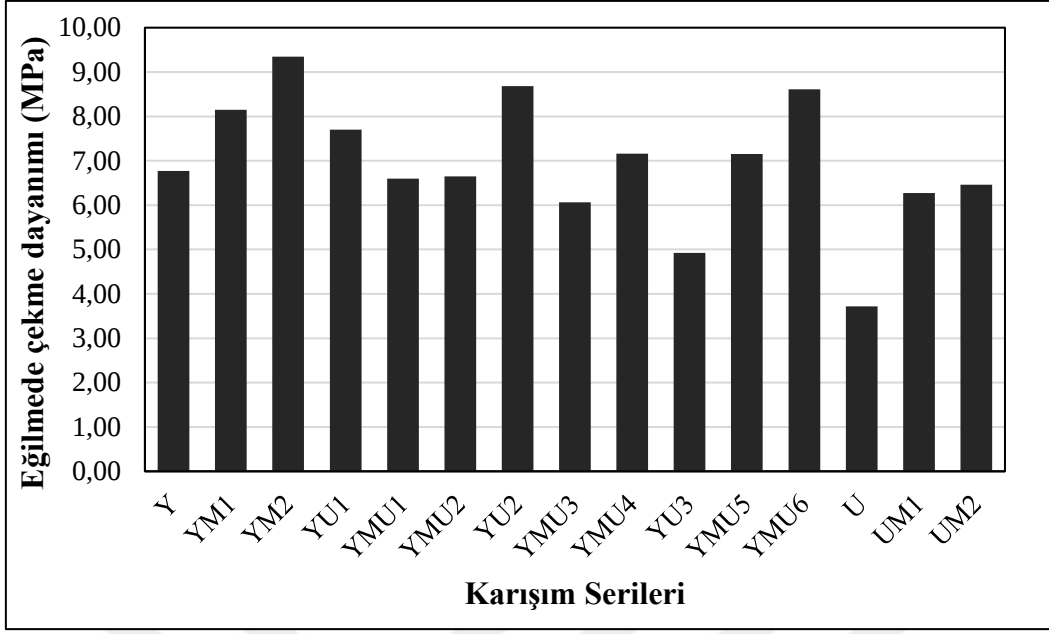
Öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranı fazla olan serilerde metakaolin boşluk oranını arttırmıştır. Bu serilerde kıvam daha yoğun olduğu için harcın karılmasından veya kalıba yerleştirilmesinden kaynaklı porozite değerlerinde artış olduğu da düşünülmektedir.



Şekil 4.4. Tüm serilerin porozite yüzdeleri

4.5. BT'nin Eğilmede Çekme Dayanımı Üzerine Etkisi

Metakaolin oranının artışı çoğu seride ciddi oranda eğilmede çekme dayanımı açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere en yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip olan seri YM2 serisidir ve 9,345 MPa değerindedir. Resim 4.1.'te bu serinin kopma sonrası görseli verilmiştir. Y ve YM1 serilerinin değerleri sırası ile 6,77 MPa ve 8,15 MPa'dır. YU1, YMU1 ve YMU2 serilerinin eğilme dayanımlarında bir dalgalanma görülmüştür. Seriler arasında çok ciddi farklar olmamakla birlikte değerleri sırası ile 7,70 MPa, 6,60 MPa ve 6,65 MPa'dır. YMU1'de düşüş olsa dahi metakaolin oranındaki artış az da olsa bunu telafi etmeye yönelmiştir. Benzer şeyler fakat daha yüksek bir farkla YU2, YMU3 ve YMU4 serilerinde görülmüştür. Bu serilerin eğilmede çekme dayanımları da sırası ile 8,68 MPa, 6,06 MPa ve 7,16 MPa'dır.



Şekil 4.5. Tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları



Resim 4.1. YM2 serisinin kopma sonrası görseli

Uçucu kül serilerde eğilmede çekme dayanımını düşürmekle birlikte genel olarak metakaolin yüzdesinin artışının da uçucu kül oranı daha düşük aynı orandaki metakaolin ikameli harçların eğilmede çekme dayanımı değerlerine yakın seviyelere getirdiği görülmektedir. En düşük eğilmede çekme dayanımına sahip seri ise U seridir ve değeri 3,72 MPa'dır. U serisinin görseli Resim 4.2.'de gösterilmiştir. Uçucu kül kullanımının azalttığı eğilme dayanımı değerlerini metakaolinin iyileştirdiği görülmektedir. UM1 ve UM2

serilerinin eğilmede çekme dayanımı sırasıyla 6,27 MPa ve 6,46 MPa'dır. YU3, YMU5 ve YMU6 serilerinde de metakaolinle birlikte ciddi eğilme dayanımı artışları görülmektedir. Serilerin eğilmede çekme dayanım değerleri sırasıyla 4,96 MPa, 7,15 MPa ve 8,61 MPa'dır.



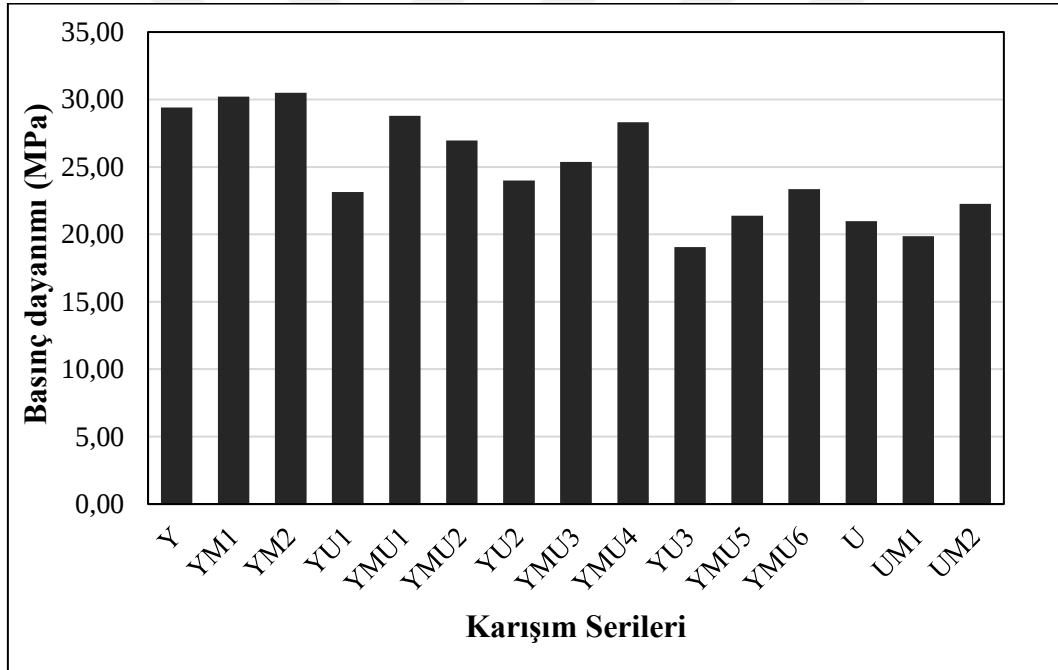
Resim 4.2. U serisinin kopma sonrası görseli

4.6. BT'nin Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi

Basınç dayanımı beton için en önemli etmenlerin başında gelmektedir. Şekil 4.6.'da görüldüğü üzere tüm serilerin basınç dayanımı çimentosuz bir beton için kabul edilebilir değerler göstermiştir. En yüksek basınç dayanımı ise YM2 serisine aittir. Bu serinin basınç dayanımı değeri ise 30,50 MPa'dır. Seriyeye ait bir numunenin kırılma görseli Resim 4.3.'te verilmiştir. Bu seriye en yakın değer 30,22 MPa ile YM2 ve 29,41 MPa ile Y serileridir. Metakaolin oranındaki artışın yalnızca öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılan serilerde basınç dayanımında da artışa yol açtığı görülmektedir. YU1, YMU1 ve YMU2 de yaşanan dalgalanma harcın kalıplara yerleştirilirken yeterince sıkıştırılmamış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü sonraki serilerde de genellikle metakaolin oranındaki artışla basınç dayanımı doğru orantılı şekilde ilerlemiştir. YU2, YMU3 ve YMU4 serileri de basınç dayanımında metakaolin oranındaki artış ile artma eğilimindedir. Serilerin değerleri sırasıyla 21,44 MPa, 25,38 MPa ve 27,06 MPa'dır.



Resim 4.3. YM2 serisinin kırılma görseli



Şekil 4.6. Tüm serilerin basınç dayanımları

En düşük basınç dayanımı YU3 serisininidir. YU3 serisinin basınç dayanımı 19,06 MPa'dır. Serinin görseli Resim 4.4.'te verilmiştir. Sonraki serilerin değerleri arasında da çok büyük farklılıklar olmamakla birlikte YMU5 21,39 MPa, YMU6 23,36 MPa, U 20,98 MPa, UM1 19,86 MPa ve UM2 22,27 MPa'dır. UM1 ve UM2 arasındaki dalgalanma yine benzer şekilde kalıplama esnasında harcın yeterince sıkıştırılmamasından kaynaklanabilir.



Resim 4.4. YU3 serisinin kırılma görseli

Metakaolin serilerde dalgalanmalar göstermiştir. Bazı karışımlarda oranının artışı olumlu sonuç verirken bazı karışımlar için ise olumsuz sonuçlar vermiştir. Ama uçucu kül oranının artışının basınç dayanımını olumsuz etkilediği yukarıdaki Şekil 4.6'dan da net bir şekilde görülmektedir. Bu sonuç porozitenin artışı ile de açıklanabilir. Boşluklu yapının kırılmanın daha kolay ilerlemesine sebep olduğu düşünülmektedir. YU3 serisinin en yüksek poroziteye ve en düşük basınç dayanımına sahip seri olması bu düşüncüyü destekler niteliktedir.

Zhang ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada metakaolin ve taban külü ile ürettikleri geopolimer numunelerin mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Metakaolin ve taban külü bazlı geopolimerin, geleneksel çimentolu betona göre 28 günlük basınç dayanımının %49 daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca erken yaşlarda geopolimer beton çimentolu betonlara göre daha yüksek dayanıma sahiptir.

Casero ve ark. (2022), aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullandıkları metakaolin bazlı geopolimerde %25-75 oranlarında uçucu kül değişiminin geopolimerin özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Genellikle uçucu kül ilaveli geopolimerin daha düşük basınç dayanımlarına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat elde edilen sonuçların taşıyıcı duvarlar için standartları karşılayabileceğini vurgulamışlardır.

Ma ve ark. (2023), uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile hazırladıkları geopolimerlerde bu iki bağlayıcının birbirine oranının geopolimerin mekanik özelliklerini

ciddi bir şekilde etkilediğini, uçucu kül/cüruf oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir.

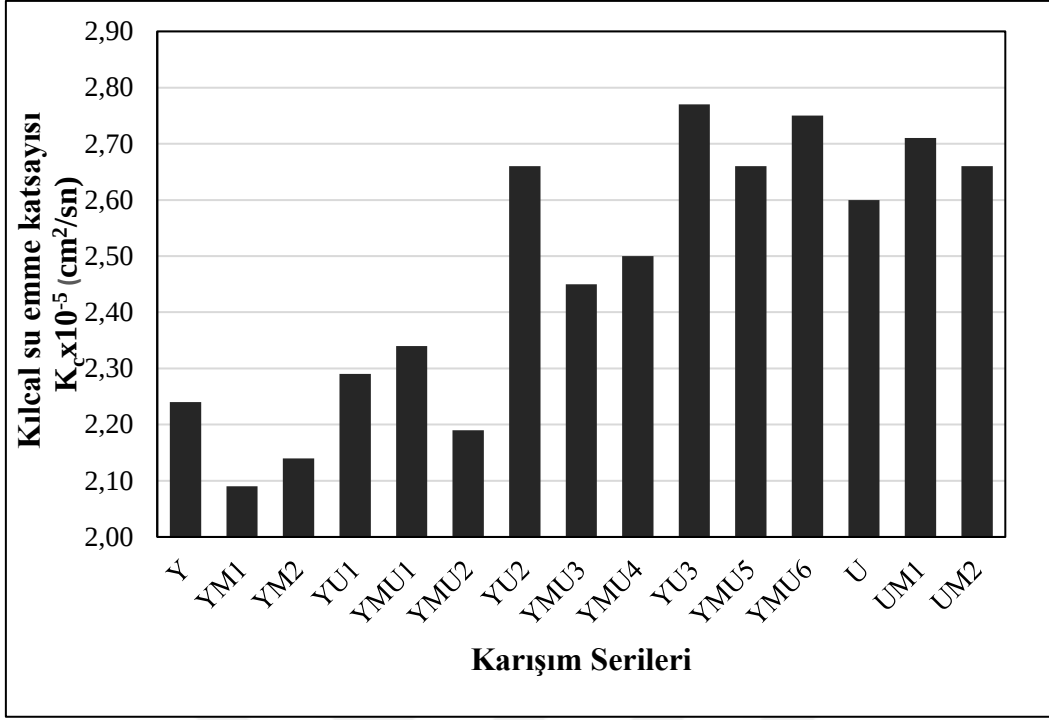
4.7. BT'nin Kılcal Su Emme Üzerine Etkisi

Kılcal su emme betonun dayanıklılığı açısından önemli bir durabilite özelliğidir. Dışarıdan beton bünyesine alınan tuzlu su gibi farklı içerikteki sular beton içinde tepkimeye girmemiş kalsiyum oksit gibi bileşiklerle reaksiyona girerek betonda genleşme ve çatlamalara yol açabilmektedir. Bu da dayanımı da etkileyebilecek ciddi bir yapısal sorundur.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere en düşük kılcal su emme katsayısına sahip seri YM1 serisidir. En yüksek kılcal su emme katsayısına sahip seri ise YU3 serisidir ve değeri $2,77 \times 10^{-5}$ 'tir. En düşük kılcal geçirimlilik katsayısına sahip seri ise YM1 serisidir ve değeri $2,09 \times 10^{-5}$ 'tir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun karışımdaki oranın azalmasıyla kılcal su emme de artışlar gözlemlenmeye başlamıştır. Yalnızca cüruf ve metakaolin kullanımı kılcal su emmenin en düşük olduğu değerlerdendir. Bunun yanı sıra toplam bağlayıcı miktarının %10'u metakaolin geri kalanın %75'i cüruf %25'i uçucu kül olan seri de diğer serilere göre oldukça düşük bir değer göstermiştir. Bu serinin kılcal su emme değeri ise $2,19 \times 10^{-5}$ 'tir.

Normal bir çimentolu betona göre tüm serilerin kılcal su emme değerleri oldukça düşüktür. Değerler arasında da çok ciddi farklılıklar mevcut değildir. Resim 4.5. ve 4.6.'da tüm serilerin kılcal su emme sonundaki görselleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Tüm serilerin kılcal su emme katsayıları



Resim 4.5. Y, YM1, YM2, YU1, YMU1, YMU2, YU2, YMU3 ve U serilerinin kılcal su emme deneyi sonundaki görselleri



Resim 4.6. YMU4, YU3, YMU5, YMU6, UM1 ve UM2 serilerinin kılcal su emme deneyi sonundaki görselleri

İlkentapar ve ark. (2017), ısıt kür süresi ve ısıt kür süresinden sonraki dinlenme süresinin geopolimer uçucu kül harcının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Isıt kür süresinin artmasıyla harçların dayanımlarının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Kürleme süresi boyunca karışımındaki su zamanla kurumuş, daha uzun ısıt kürü de daha fazla suyun kurumasına sebep olarak gözenek hacmini arttırmıştır. Bu durumda daha fazla su alımına dolayısıyla daha yüksek kılcal su emme katsayısına sebep olacağını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, ısıt kürü sonrası ekstra dinlenme süresinde gözenek hacmini arttırarak daha yüksek kılcal su emmeye neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Yurt (2020), tek bağlayıcı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufunu kullandığı çalışmada üç farklı molarite (8, 10 ve 12 M) değerinde sodyum hidroksit ve sodyum silikat sulu çözeltileri kullanarak ürettiği numuneleri 18 saat süreyle 25°C (ortam sıcaklığında), 60°C ve 90°C olmak üzere üç farklı aktivasyon sıcaklığı uygulamıştır. Numuneler laboratuvar koşullarında 90 gün süreyle dayanım kazanmaları için bekletildikten sonra mekanik ve durabilite özelliklerine bakılmıştır. Her molarite değerinde kür sıcaklığının artışı ile basınç dayanımı da artmıştır. Ayrıca numunelerin kürleme sıcaklığı arttıkça gözenekli yapıları küçüldüğünden kılcal su emmenin de azaldığı görülmüştür.

Yön ve Karataş (2022), bor atığı ve granüle yüksek fırın cürufu kullanarak kendi kendine yerleşen geopolimer harç üzerine çalışmalar yapmışlardır. Numuneleri 60°C ve

100°C’de 3 gün boyunca ısı k r ne tabii tutmuşlardır. Sonuçlara göre en düşük kılcal su emme %100 c r f içerikli numunelerde gözlemlenmiştir. En yüksek eğilme ve basınç dayanımı da bor atığı içermeyen numunelerde g r lm ştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre:

- Numuneler işlenebilirlik açısından değerlendirildiğinde uçucu kül oranının artışı işlenebilirliği de arttırmıştır.
- Kuru yığın yoğunluk ve DYK yığın yoğunluk benzer davranışlar göstermiştir. İkisinde de en yüksek değerler %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren Y serisine aittir.
- Su emme değerlerinde uçucu kül oranındaki artış ile genellikle artış görülmüştür. En yüksek su emme değeri %9,55 ile UM1 (%95 uçucu kül ve %5 metakaolin) serisidir.
- Numunelerin porozite değerlerinde belirsiz bir dalgalanma mevcuttur. Bununla birlikte en yüksek porozite değeri %19,65 ile YU3 (%25 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül) serisine aittir.
- Numunelerin eğilmede çekme dayanımında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve metakaolin etkin rol oynamıştır. En yüksek eğilme dayanımı 9,35 MPa olan YM2 (%90 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %10 metakaolin) serisine aittir.
- Basınç dayanımında öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranı yüksek seriler iyi sonuçlar vermiştir. Basınç dayanımı en yüksek seri eğilme dayanımında da olduğu gibi YM2 serisidir. Dayanım değeri 30,50 MPa'dır.
- Değerler incelendiğinde uçucu kül oranının artışı kılcal su emmeyi de arttırmıştır. Yine de sonuçlar geleneksel çimentolu harçlara kıyasla daha iyi değerdedir.

Bu çalışmada yapısal olarak çimentosuz betonun kullanılabilirliği konusunda fikir sahibi olunmuştur. Ancak geopolimer teknolojisinde büyük problemlerden ortam sıcaklığında priz süresi, kuruma büzülmesi ve korozyon gibi sahada karşılaşılabilecek problemler üzerine daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca atık geri dönüşümü ile sağlanmak istenen eko-verimlilik açısından kullanılan kimyasallar bakımından maliyet analizlerinin yapılması daha verimli sonuçların elde edilmesi bakımından önerilmektedir.

6.KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, Z., Pacheco-Torgal, F., Félix, T., Tahri, W., Barroso Aguiar, J.,** 2015. Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam. *Construction and Building Materials*, 80:18-30.
- Al-Hasani, H.J.M.,** 2023. Yüksek fırın cürufunun uçucu kül bazlı geopolimer tuğla özelliklerine etkisinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, 66s.
- Aziz, A., Stocker, O., El Hassani, I., Laborier, A.P., Jacotot, E., El Khadiri, A., El Bouari, A.,** 2021. Effect of blast-furnace slag on physicochemical properties of pozzolan-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*, 258:123880.
- Barness, P.,** 2001. Structure and performance of cements. *Metakaolin as a Pozzolanic Addition to Concrete*, USA. Chapter 15.
- Bayram, U.,** 2023. Geri kazanılmış agregaların geopolimer sistemlerde kullanımının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 109s.
- Berry, E., E., Hemmings, R., T., Cornelius, B., J.,** 1990. Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars. *Cement and Concrete Composites*, 12:253-261.
- Bingöl, Ş., Bilim, C., Atiş, C.D., Durak, U.,** 2020. Durability properties of geopolymer mortars containing slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44:561-569.
- Bowen, F., Jiesheng, L., Jing, W., Yaohua, C., Tongtong, Z., Xiaoming, T., Zhengguang, S.,** 2022. Investigation on the impact of different activator to solid ratio on properties and micro-structure of metakaolin geopolymer. *Case Studies in Construction Materials*, 16:e01127.
- Davidovits, J.,** 1991. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8):1633-1656.
- Davidovits, J.,** 2013. Geopolymer cement a review, published in Geopolymer Science and Technics, *Technical Paper 21*, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org, 16 Mayıs 2023.
- Demirel, C., Şimşek, O.,** 2014. C30 sınıfı atık betonun geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(2):45-53.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., ve A., Uçar,** 2009. Yüksek fırın cürufunun çimento yüzey özelliklerine ve hidratasyona etkileri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19:47-58.

- Duan, P., Yan, C., Luo, W.,** 2016. Technical note a novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 124:69–73.
- Durak, U.,** 2019. Nanoparçacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması. *Doktora Tezi*. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 176s.
- Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., Uzal, B., Atiş, C.D.,** 2021. A new parameter influencing the reaction kinetics and properties of fly ash based geopolymers: A pre-rest period before heat curing. *Journal of Building Engineering*, 35:102023.
- Erdoğan, T.Y.,** 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara, Türkiye, 757s.
- Erdoğan, T.Y.,** 2007. Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri. *II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 12-13 Nisan.
- Feldman, R.F., Carette, G.G., Malhotra, V.M.,** 1990. Studies on mechanics of development of physical and mechanical properties of high-volume fly ash cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 12:245-251.
- Gomez-Casero, M.A., Dios-Arana, C., Bueno Rodriguez, J.S., Perez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D.,** 2022. Physical, mechanical and thermal properties of metakaolin-fly ash geopolymers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 26:100620.
- Gupta, A.,** 2021. Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica fume. *Materialstoday Proceedings*, 44:23-28.
- Görhan, G.,** 2020. Geopolimer harç özelliklerine metakaolin kalsinasyon sıcaklığının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (1):83-89.
- Görhan, G., Kürklü, G.,** 2023. Investigation of the effect of metakaolin substitution on physicommechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars. *Materialstoday Proceedings*, 81(1):35-42.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H.,** 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Ve Fuarı*, IMCET 2005, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Gülmez, N.,** 2018. Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi. *Doktora Tezi*. Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 198s.
- Gültekin, E.,** 2014. Metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 60s.

- İlkentapar, S., Atiş, C.D., Karahan, O., Görür Avşaroğlu, E.B.,** 2017. Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 151:363-369.
- Jithendra, C., Dalawai, V.N., Elavenil, S.,** 2022. Effects of metakaolin and sodium silicate solution on workability and compressive strength of sustainable Geopolymer mortar. *Materialstoday Proceedings*, 51(3):1580-1584.
- Kabirova, A.,** 2022. Farklı tür dolgu malzemeleri katılan metakaolin esaslı geopolimer harçların dayanım ve dayanıklılığının araştırılması. *Doktora Tezi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 158s.
- Kandil, U.,** 2021. Farklı mineral katkı içeren geri kazanılmış agregalı kendiliğinden yerleşen betonların bazı mekanik ve durabilite özellikleri. *Doktora Tezi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 221s.
- Karahan, O., Atiş, C.D.,** 2011. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design*, 32(2):1044-1049.
- Karakaş, H., İlkentapar, S., Durak, U., Örklemmez, E., Özuzun, S., Karahan, O., Atiş, C.D.,** 2023. Properties of fly ash-based lightweight-geopolymer mortars containing perlite aggregates: Mechanical, microstructure, and thermal conductivity coefficient. *Construction and Building Materials*, 362:129717.
- Kartalkanat, A.,** 2009. Çimento Fabrikalarının Çevreye Muhtemel Etkileri. www.ovamadokunma.com/2009/11/01/cimento-fabrikalarinn-cevreye-muhtemel-etkileri, 11 Nisan 2023.
- Kavazoğlu, F.B.,** 2021. Bakteri içeren geopolimer harçların özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 82s.
- Kaya, K., Soyer-Uzun, S.,** 2016. Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud-metakaolin based geopolymer systems. *Ceramics International*. 42:7406–7413.
- Khaled, Z., Mohsen, A., Soltan, A., Kohail, M.,** 2023. Optimization of kaolin into metakaolin: calcination conditions, mix design and curing temperature to develop alkali activated binder. *Ain Shams Engineering Journal*, 14: 102142.
- Khoury, G., Majorana, C., Pesavento, F., Schrefler, B.,** 2002. Modelling of heated concrete, *Magazine of Concrete Research*, 54(2):77-101.
- Kostuch, J. A., Walters, G.V., Jones, T.R.,** 1993. High performance concrete incorporating metakaolin: a review. *Concrete 2000*, 2:1799-1811.
- Li, Z., Li, S.,** 2018. Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163:668-680.

- Ma, B., Zhu, Z., Huo, W., Yang, L., Zhang, Y., Sun, H., Zhang, X., 2023.** Assessing the viability of a high performance one-part geopolymer made from fly ash and GGBS at ambient temperature. *Journal of Building Engineering*, 75:106978.
- Marvila, M.T., Azevedo, A.R.G., Junior, J.A.T.L., Vieira, C.M.F., 2023.** Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na₂O. *Journal of Materials Research and Technology*, 23:4551-4565.
- Mobili, A., Belli, A., Giosuè, C., Bellezze, T., Tittarelli, F., 2016.** Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. *Cement and Concrete Resign*, 88: 198–210.
- Novais, R.M., Ascensão, G., Ferreira, N., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2018.** Influence of water and aluminium powder content on the properties of wastecontaining geopolymer foams. *Ceramics International*, 44(6):6242-6249.
- Novais, R.M., Pullar, R.C., Labrincha, J.A., 2019.** Geopolymer foams: an overview of recent advancements. *Progress in Materials Science*, 109:100621.
- Oğuz, M., 2019.** Geri dönüştürülmüş betonların köpük betonda kullanılabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Bartın Üniversitesi, Bartın, 117s.
- Olçay, Y.E., 2022.** Deniz suyunun farklı bağlayıcı miktarlarına sahip uçucu küllü ve yüksek fırın cürufu geopolimer betonlara etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, 86s.
- Oyejobi, D.O., Adewuyi, A.P., Hassan, I.A., Suleiman, I., Oyebanji, Y.O., Yusuf, S.O., 2023.** Performance evaluation of fly-ash based geopolymer mortar. *Materialstoday Proceedings*, 86:88-95.
- Öz, A., Kara, İ.B., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Aydın, A.C., 2023.** Characterization study of geopolymer concretes fabricated with clinker aggregates. *Construction and Building Materials*, 384:131461.
- Özer, I., Soyer-Uzun, S., 2015.** Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. *Ceramics International*. 41:10192–10198
- Özsöylev, T., 1993.** Hazır Beton ve Ekipmanları. Birsen Yayınevi, İstanbul, 225 s.
- Polat, D., 2020.** Process parameters and mechanical properties of geopolymer glass foam structures. *Yüksek Lisans Tezi*. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 90s.
- Rasool, H., 2022.** Fresh and hardened properties of rubberized fly ash based geopolymer composite. *Yüksek Lisans Tezi*. Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 73s.

- Rovnaník, P.**, 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24:1176–1183.
- Saha, S., Rajasekaran, C.**, 2017. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 146:615-620.
- Saloni, Parveen, Lim, Y.Y., Pham, T.M.**, 2021. Effective utilisation of ultrafine slag to improve mechanical and durability properties of recycled aggregates geopolymer concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 5:100330.
- Sawarkar, P., Pote, A., Murmu, A.L.**, 2023. Properties of blast furnace slag geopolymer concrete. *Materialstoday Proceedings*.
- Sevinç, A.H.**, 2021. Farklı tane boyutuna sahip Afşin-Elbistan uçucu külünün geopolimer hammaddesi olarak kullanımı. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2):751-765.
- Shilar, F.A., Ganachari, S.V., Patil, V.B., Reddy I.N.**, 2023. Preparation and validation of sustainable metakaolin based geopolymer concrete for structural application. *Construction and Building Materials*, 371:130688.
- Siddique, R., Khan, M.I.**, 2011. Supplementary cementing materials. *Engineerings Materials*, Springer, 287s.
- Sun, Z., Vollpracht, A.**, 2018. Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag. *Cement and Concrete Resign*, 103: 110–122.
- Souri, A., Kazemi-Kamyab, H., Snellings, R., Naghizadeh, R., Golestani-Fard, F., Scrivener, K.**, 2015. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. *Cement and Concrete Resign*, 77:47-59.
- Şahin Yön, M., Karataş, M.**, 2022. Evaluation of the mechanical properties and durability of self-compacting alkali-activated mortar made from boron waste and granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 61:105263.
- Şinik, O.**, 2019. Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 80s.
- Tan, J., Çizer, Ö., Vandevyvere, B., Vlieger, J., Dan, H., Li, J.**, 2022. Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, 58:105001.
- TS 802**, 2009. Beton karışım hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB)**, Hazır Beton Sektörü İstatistikleri, 2022. Ankara.

- URL-1**, 2023. <https://www.santiyede.com/yuksek-firin-curufu-betonda-kullanimi/>. Yüksek Fırın Cürufu- Betonda Kullanımı. Erişim: 28 Nisan 2023.
- Witzke, F.B., Beltrame, N.A.M., Luz, C.A., Medeiros-Junior, R.A.**, 2023. Abrasion resistance of metakaolin-based geopolymers through accelerated testing and natural wear. *Wear*, 530-531:204996.
- Wu, Z., Naik, T.R.**, 2002. Properties of concrete produced from multicomponent blended cements. *Cement Concrete Resign*, 32(12):1937-1942.
- Yang, T., Zhu, H., Zhang, Z.**, 2017. Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars. *Construction Building Materials*, 153: 284–293.
- Yazıcı, Ş., Anuk, D., Arel, H. Ş.**, 2010. Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2):13-24.
- Yolcu, A.**, 2023. Yüksek fırın cürufu bağlayıcılı geopolimer betonun yüksek sıcaklık dayanımına iri lastik atığının ve nano silisin etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. İnönü Üniversitesi, Malatya, 111s.
- Yonar, Y.**, 2014. Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı. *Yüksek Lisans Tezi*. Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 75s.
- Yurt, Ü.**, 2020. High performance cementless composites from alkali activated GGBFS. *Counstruction and Building Materials*, 264:120222.
- Zhang, Z., Yu, J., Qin, F., Sun, F.**, 2023. Thermal effect on mechanical properties of metakaolin-based engineered geopolymer composites (EGC). *Case Studies in Construction Materials*, 18:e02150.

ÖZGEÇMİŞ

